

مقدمة قصيرة جدًّا

المجرَّات

جون جريبين

المجرَّات

جون جريبين

Galaxies

John Gribbin

الطبعة الأولى ٢٠١٥م
رقم إيداع ١٥٦٥٩ / ٢٠١٤
جميع الحقوق محفوظة للناشر مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦ / ٨ / ٢٠١٢

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٠٦٣٥٢ ٢٠٢ + **فاكس:** ٣٥٣٦٥٨٥٣ ٢٠٢ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

جريبين، جون.
المجرَّات: مقدمة قصيرة جدًّا/تأليف جون جريبين.
تدمك: ٩٧٨ ٩٧٧ ٧٦٨ ٠٥٨ ٥
١-المجرَّات (فلك)
أ-العنوان
٥٢٣٫١١٢

تصميم الغلاف: إيهاب سالم.

المحتويات

إلى أخي، الذي اقترح عليَّ تأليف هذا الكتاب.

مقدمة

لم تبدأ الدراسة العلمية للمجرَّات إلا منذ فترة قريبة، في عشرينيات القرن العشرين، حين تأكَّدَ للمرة الأولى أن بقع الضوء الغائمة المبهمة العديدة التي تُرَى من خلال التليسكوبات هي جزر في الفضاء تتألَّف من أعداد ضخمة من النجوم، بعيدة للغاية عن حدود مجرتنا؛ مجرَّة درب التبانة. فمن دون التليسكوبات لم نكن لنتمكَّن مطلقًا من استكشاف الكون فيما وراء مجرَّة درب التبانة أو البحث في طبيعة المجرَّات، مع أن التليسكوبات احتاجت نحو أربعمائة عام كي تتطور إلى النقطة التي تصير معها الطبيعةُ الحقيقية للمجرَّات واضحةً.

وعلى حد علمنا، فإن أول مَن استخدم تليسكوبًا للنظر إلى سماء الليل كان ليونارد ديجز، وهو رياضي ومسَّاح تلقَّى تعليمه في أكسفورد، وكان أول مَن اخترع المِزواة في حدود عام ١٥٥١. وقد أبقى ليونارد ديجز على استخدامه للتليسكوب (الذي كان بالأساس مِزواةً موجَّهَةً صوب السماء) طيَّ الكتمان؛ وذلك بسبب القيمة التي كانت المزواة تمثِّلها لعمله، لكنه ألَّفَ واحدًا من أوائل الكتب الرائجة بالإنجليزية عمَّا يُسمَّى الآن العلم، وقد تضمَّنَ الكتاب وصفًا للنموذج الكوني البطلمي الذي فيه تكون الأرضُ مركزَ الكون. توفي ليونارد عام ١٥٥٩، لكن ابنه توماس ديجز تابَع السير على خطاه، وقد صار توماس — المولود في أربعينيات القرن السادس عشر — رياضيًّا، وفي عام ١٥٧١ رتَّب لنشر أحد الكتب التي كان والده قد ألَّفها، وفي هذا الكتاب ورَدَ أول وصف للتليسكوب في مادة مطبوعة. أجرى توماس ديجز هو الآخَر مشاهدات فلكية، وفي عام ١٥٧٦ نشر نسخة مزيدة منقَّحَة من كتاب والده الأول، تضمَّنَتْ أول توصيف مطبوع مكتوب بالإنجليزية للنموذج الكوني الكوبرنيكي، الذي فيه تكون الشمس هي مركز الكون.

في ذلك الكتاب، الذي يحمل عنوان «تكهُّنٌ أبدي»، قال ديجز الابن إن الكون غير محدود، وضمَّنَ رسمًا توضيحيًّا للشمس، تدور حولها الكواكب، في مركز منظومة من النجوم تمتد بلا نهاية في جميع الاتجاهات. وبما أننا نعرف أن ديجز كان يملك تليسكوبًا واحدًا على الأقل، فإن الاستنتاج الطبيعي الذي نخرج به من هذا هو أنه استخدم التليسكوب في النظر إلى حزمة الضوء المنتشرة عبر السماء والمعروفة باسم درب التبانة (الطريق اللبني)، واكتشف أنها تتألف من عددٍ لا يُحصَى من النجوم المنفردة.

قد تصيبنا قصة ليونارد وتوماس ديجز بالدهشة؛ لأن الشخص الذي يُنسَب له عادةً فضلُ صناعة واستخدام أول تليسكوب فلكي، وكذلك اكتشاف أن مجرَّة درب التبانة تتكون من نجوم؛ هو جاليليو جاليلي، وذلك في نهاية العقد الأول من القرن السابع عشر. لكن في الواقع، اختُرِع التليسكوب على يد أكثر من شخص بصورة مستقلة في شمال غرب أوروبا، ولم تصل أنباءُ هذا الاختراعِ إلى إيطاليا، آتيةً من هولندا، إلا في عام ١٦٠٩. وقد بنى جاليليو — معتمِدًا فقط على وصفٍ لهذه الأداة — تليسكوبًا خاصًّا به، وكان الأولَ ضمن تليسكوبات عدة، ثم وجَّهَه إلى السماء شأن غيره من المعدات الكثيرة الأخرى. وقد نُشِرت اكتشافاته في كتابٍ بعنوان «رسول السماء» عام ١٦١٠، وجعل هذا منه رجلًا شهيرًا، وهذا هو مصدر الخرافة المنتشرة القائلة بأن جاليليو أول فلكي يستخدم التليسكوب. إلا أن جاليليو — شأن توماس ديجز من قبله — لاحَظَ بالفعل أن مجرَّة درب التبانة تتألَّف من مجموعة كبيرة من النجوم.

كان توماس رايت — صانع أدواتٍ وفيلسوف إنجليزي عاش في القرن الثامن عشر — هو مَن أخذ الخطوة التالية على طريق فهم موضعنا في الكون، لكن إسهامات رايت — مثلما حدث مع ديجز — ذهبت طي النسيان تقريبًا. تشكِّل مجرَّة درب التبانة حزمةً من الضوء تمتد عبر سماء الليل، وفي كتاب رايت «نظرية أصيلة أو فرضية جديدة عن الكون» المنشور عام ١٧٥٠، اقترح أن درب التبانة تتكون من مجموعة من النجوم، شبَّهها بقرص المطحنة. بل الأكثر إثارةً للدهشة أنه أدرك أن الشمس ليست مركز هذه المجموعة الشبيهة بالقرص من النجوم، وإنما تقع في أحد أطرافها. بل إنه اقترح أن الكرات الغائمة من الضوء المرئي عبر التليسكوب، والمعروفة باسم السُّدُم بسبب شبهها بالسحب، قد تقع خارج درب التبانة، مع أنه لم يُقدِم على قفزة الخيال المطلوبة لاقتراح أن هذه السُّدم قد تكون منظومات نجمية أخرى شبيهة بدرب التبانة نفسها. وكان إيمانويل كانط، وهو عالم فيلسوف آخر، هو مَن التقط هذه الأفكار من رايت وأخذ الخطوة التالية، مقترحًا أن السدم قد تكون «جزرًا كونية» شبيهة بدرب التبانة. لكن لم تُؤخَذ هذه الفكرة بجدية.

مع تحسُّن التليسكوبات، اكتُشِف المزيد والمزيد من السُّدم وجرت فهرستها، ومن الأسباب التي دعت إلى الفهرسة الحريصة للسُّدم تلهُّفُ فلَكِيِّي أواخر القرن الثامن عشر وأوائل القرن التاسع عشر للعثور على المذنبات، ومن الوهلة الأولى تبدو بقعة الضوء الباهتة الخاصة بالسديم أشبه ببقعة الضوء الباهتة الخاصة بالمذنب؛ ومن ثَمَّ بدأ أشخاص على غرار شارل مسييه، في ثمانينيات القرن الثامن عشر، ووليام هيرشل — الذي أكمل فهرسًا للسدم عام ١٨٠٢ — في تحديد مواضع السدم لئلا يكون هناك أي خلط في الأمر. وقد ضمَّ فهرس هيرشل ٢٥٠٠ سديم، أغلبها نعرف اليوم أنها مجرَّات. وعلى مدار العشرين عامًا التالية حاول هيرشل معرفة مِمَّ تتكون هذه السدم، لكن حتى أكبر تليسكوباته — ذو المرآة البالغ قطرها ٤٨ بوصة (١٫٢ متر) — كان عاجزًا عن تبيُّن أن بقع الضوء الباهتة إنما هي نجوم. وقد مات هيرشل عام ١٨٢٢ مقتنعًا بأن السدم كانت في حقيقتها سحبًا رقيقة من المادة وموجودة داخل درب التبانة.

أخذ الخطوة الرصدية التالية ويليام بارسونز، الإيرل الثالث لروس، الذي بنى تليسكوبًا عملاقًا ذا مرآة قطرها ٧٢ بوصة (١٫٨ متر) في أربعينيات القرن التاسع عشر. وبهذا التليسكوب وجد بارسونز أن سُدمًا عدة لها بِنْية حلزونية؛ مثل النمط الذي تتخذه الكريمة عند تقليبها داخل قدحٍ من القهوة السوداء. وعلى مدار العقود التالية، تأكَّد أن بعض السدم هي سحب ساطعة من الغاز موجودة داخل مجرَّة درب التبانة، فيما تبيَّنَ أن البعض الآخَر مكوَّنٌ من مجموعات من النجوم، على نطاق أصغر كثيرًا من مظهر الطريق اللبني المرتبط بمجرَّة درب التبانة، لكن السُّدم الحلزونية لم تتوافق مع أيٍّ من التصنيفين. وقد يَسَّرَ تطور التصوير الفلكي في النصف الثاني من القرن التاسع عشر دراسة السُّدم الحلزونية، لكن لم تكن الصور من الجودة بحيث تكشف عن طبيعتها الحقيقية.

وفي بداية القرن العشرين، اتفق أغلب الفلكيين على أن السُّدم الحلزونية كانت سحبًا دوَّارة من المادة تُحيط بنجم في طور التكوُّن؛ كالسحب التي يُعتقَد أن مجموعتنا الشمسية تكوَّنَتْ منها. لكن على مدار العقدين التاليين بدأت فكرة الجزر الكونية تكسب عددًا كافيًا من المؤيِّدين؛ مما حدا بالأكاديمية الوطنية الأمريكية للعلوم إلى أن تستضيف مناظَرةً حول هذا الموضوع بين هارلو شابلي، الذي كان يعمل وقتها في مرصد ماونت ويلسون في كاليفورنيا، وكان يتحدث بصوت الأغلبية الرافضة لفكرة الجزر الكونية، وبين هيبر كيرتس، من مختبر ليك بكاليفورنيا، المؤيِّد لها. وقد صارت هذه المناظَرة — التي انعقدت

في السادس والعشرين من أبريل عام ١٩٢٠ — تُعرَف لدى الفلكيين باسم «المناظَرة العظمى». ومع أنها لم تنجح في حسم القضية، فإنها مثَّلَتِ اللحظةَ التي بدأت فيها الدراسة العلمية الحديثة للمجرَّات.

الفصل الأول

المناظرة العظمى

كان هناك جانبان للمناظرة الفلكية العظمى التي انعقدت في السادس والعشرين من أبريل عام ١٩٢٠؛ وهما: حجم مجرَّة درب التبانة، وطبيعة السُّدم الحلزونية. في الواقع، لم تكن تلك مناظَرةً حقًّا؛ إذ ألقَى كلٌّ ضيف من الضيفَيْن عرضًا تقديميًّا مُدَّته أربعون دقيقة، ثم جرت مناقشة عامة بعد ذلك. كان موضوعُ الاجتماع المنعقد، فيما كان يُعرَف وقتها باسم «المتحف القومي الأمريكي» ويُعرَف الآن باسم «متحف سميثسونيان للتاريخ الطبيعي»، هو «حجم الكون». كان لدى كلٍّ من شابلي وكيرتس رأيان مختلفان بشأن ما كان يعنيه هذا، وقد استفاضَ كلٌّ منهما في شرحِ رأيه في ورقتين بحثيتين نُشِرتا في العام التالي. جوهريًّا، كان شابلي يرى أن مجرَّةَ درب التبانة «هي» الكون، أو على الأقل الشيء الأهم في الكون، وكان مهتمًّا بحجم مجرتنا، أما كيرتس فكان يرى أن السُّدم الحلزونية هي مجرَّات شبيهة بمجرتنا، وكان مهتمًّا بحجم الأشياء الموجودة خارج مجرَّة درب التبانة.

انعقدت المناظرة في هذا الوقت تحديدًا؛ لأن الفلكيين كانوا قد طوَّروا مؤخرًا طريقةً لقياس المسافات عبر مجرَّة درب التبانة، وأصبح من الممكن قياس المسافات إلى النجوم القريبة باستخدام نفس نوع الطرق المسحية التي كان ليونارد ديجز يستخدمها، ومنها طريقة التثليث. فإذا رُصِد نجمٌ قريب في السماء مرتين تفصل بينهما ستة أشهر — حين تكون الأرض على جانبين متقابلين من مدارها حول الشمس — فسيبدو النجم وقد أُزِيح قليلًا مقارَنةً بخلفية النجوم البعيدة. وتأثير التزيح هذا يشبه ما يحدث حين ترفع أصبعك أمام وجهك ثم تنظر إليها مرتين مع إغلاق إحدى عينيك في كل مرة؛ فالأصبع وقتها ستبدو كأنها تحرَّكت مقارَنةً بالخلفية، وكلما كانت الأصبع أقرب إلى عينيك كان تأثير التزيح أكبر. وكل ما تحتاجه لحساب المسافة بين الأرض والنجم هو حجم الإزاحة

النجمية وقطر كوكب الأرض (الذي هو نفسه معروف من خلال عملية التثليث داخل المجموعة الشمسية).

لكن للأسف، أغلب النجوم بعيدة إلى درجة يستحيل معها قياس هذا التأثير، بل إن أقرب النجوم إلينا، رجل القنطور، بعيدٌ للغاية عن الشمس؛ بحيث إن الضوء المنبعث منه يستغرق ٤٫٢٩ سنوات كي يقطع الفضاء الواقع بينهما (ومن ثَمَّ فهو يبعد ٤٫٢٩ سنوات ضوئية). وبحلول عام ١٩٠٨ كان نحو مائة مسافة نجمية فقط قد قيس بهذه الطريقة. هناك طرق هندسية أخرى، مبنية على الطريقة التي تُرَى بها النجوم الموجودة في العناقيد القريبة وهي تتحرك معًا عبر الفضاء، تمكِّننا من قياس المسافات حتى نحو مائة سنة ضوئية، أو نقول نحو ٣٠ فرسخًا فلكيًّا (الفرسخ الفلكي يُقدَّر بحوالي ٣٫٢٥ سنوات ضوئية) لو استخدمنا الوحدات التي يفضِّلها الفلكيون. وقد كان هذا كافيًا تمامًا لهم كي يضبطوا أهم مؤشر للمسافات في علم الفلك.

ولتقدير أهمية مؤشر المسافات الجديد هذا حقَّ قدره ما علينا سوى النظر إلى أفضل تقديرات الحجم التي أُجرِيت في السنوات الأولى من القرن العشرين لمجرَّة درب التبانة. كان الفلكي الهولندي ياكوبس كابتين قد أحصى عدد النجوم المرئية في رقع متساوية الحجم من السماء في اتجاهات مختلفة، وأورد تقديرات بشأن المسافة الفاصلة بيننا وبين النجوم؛ وذلك استنادًا إلى الطرق التي وصفتها، واستنادًا في جزءٍ منها إلى الخفوت الذي تبدو عليه النجوم من الأرض. وقد خلص إلى أن درب التبانة لها شكل أشبه بالقرص، سُمكه نحو ٢٠٠٠ فرسخ فلكي (٢ كيلو فرسخ فلكي) في المنتصف، وقطره ١٠ كيلو فرسخ فلكي، وأن الشمس تقع قرب المنتصف. لكننا نعلم الآن أن هذا التقدير متواضع للغاية، وهو ما يرجع بالأساس إلى وجود قدر كبير من الغبار بين النجوم — وهو ما لم يعلمه كابتين — وهذا الغبار يعمل عمل الضباب بحيث يحدُّ المسافة التي يمكننا رؤيتها عبر سطح مجرَّة درب التبانة؛ وهذه الظاهرة تُعرَف باسم «الخمود النجمي». وتمامًا مثلما يتراءى للمسافر الضائع وسط الضباب أنه وحيد في مركز عالمه الصغير الخاص، كان كابتين ضائعًا وسط ضباب درب التبانة، وخُيِّلَ إليه أنه موجود في مركز كونه الصغير الخاص. ومنذ أقل من قرن مضى، كان أغلب الفلكيين يظنون أن هذا القرص من النجوم يمثِّل بالأساس «الكون» بأسره.

بدأت الأمور تتغيَّر في العقد الثاني من القرن العشرين؛ فقد اكتشفت هنريتا سوان ليفيت — التي كانت تعمل في مرصد كلية هارفرد — أن عائلة معينة من النجوم، تُعرَف

بالنجوم القيفاوية، تتباين في سطوعها بطريقة قد تمكِّننا من استخدامها كمؤشرات للمسافة؛ فكلُّ نجم قيفاوي يسطع ويخبو بطريقة منتظمة، مكررًا الدورة بدقة مرة تلو الأخرى. وبعض النجوم يمرُّ بهذه الدورة في أقل من يوم واحد، فيما يستغرق البعضُ الآخَر مئات الأيام؛ فالنجم القطبي — نجم القطب الشمالي — متغيرٌ قيفاوي ذو دورة تُقارِب أربعة أيام، مع أن تغيُّرات السطوع في هذه الحالة صغيرة للغاية بما يستحيل معه رصدها بالعين المجردة. وكان اكتشاف ليفيت الأعظم هو أن النجوم القيفاوية الأشد سطوعًا تستغرق وقتًا أطول في المرور بهذه الدورة مقارَنةً بالنجوم القيفاوية الخافتة، وأهم من ذلك أن ثمة علاقة دقيقة بين دورة النجم القيفاوي وبين سطوعه؛ فمثلًا، النجم القيفاوي الذي يستغرق خمسة أيام كي يُتِمَّ دورته يكون أشد سطوعًا عشر مرات من النجم الذي يستغرق إحدى عشرة ساعة كي يُتم دورته.

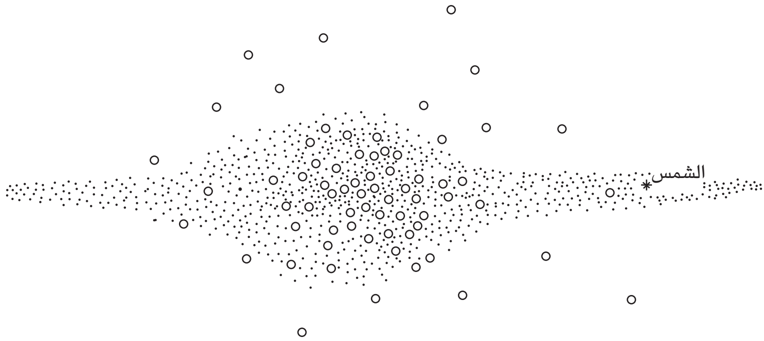
وصلت ليفيت إلى هذا الاكتشاف عن طريق دراسة الضوء الصادر عن مئات النجوم في سديم يُسمَّى «سحابة ماجلان الصغرى»، وهي منظومة نجمية مرتبطة بمجرَّة درب التبانة. لم تكن ليفيت تعلم المسافة إلى سحابة ماجلان الصغرى، لكن هذا لم يكن يهم؛ لأن كل النجوم الموجودة بها تقع تقريبًا على نفس المسافة منا؛ ومن ثَمَّ فإن سطوعها النسبي يمكن مقارنته دون القلق من أن يكون السبب وراء أن أحد النجوم يبدو أكثر خفوتًا من غيره هو أنه أبعد في المسافة مقارَنةً به. وفي عام ١٩١٣، قاس الدنماركي إينار هرتز سبرنج المسافات بيننا وبين ١٣ نجمًا قيفاويًّا قريبًا باستخدام الطرق الهندسية، واستخدم مشاهداته لهذه النجوم بالإضافة إلى معطيات ليفيت كي يحسب السطوع الحقيقي لنجم قيفاوي معياري افتراضي ذي دورةٍ قدرُها يوم واحد. وبالاستعانة بهذه المعايرة صار من الممكن قياس المسافة إلى أيِّ نجم قيفاوي آخَر عن طريق حساب سطوعه الحقيقي من واقع معايرة هرتز سبرنج ومدة دورته، ثم مقارنة هذا بمقدار الخفوت الذي بَدَا عليه النجم في السماء؛ فكلما كان أكثر خفوتًا، كان أبعد في المسافة بدرجة قابلة للحساب بدقة. كانت هذه المعايَرة لنطاق مسافات النجوم القيفاوية تعني — من ضمن ما تعني — أن سحابة ماجلان الصغرى تقع على مسافةٍ لا تقل عن ١٠ كيلو فرسخ فلكي. وقد روجعت تقديرات هرتز سبرنج بعد ذلك في ضوء المشاهدات الأدق وفهمنا الأفضل لمفهوم الخمود النجمي، لكن في عام ١٩١٣ مثَّل اقتراح أن سحابة ماجلان الصغرى تقع على هذه المسافة البعيدة زيادةً استثنائية في نطاق المسافات مقارَنةً بتقديرات كابتين لحجم مجرَّة درب التبانة كلها («الكون» بأسره!)

كان هارلو شابلي هو مَن استخدم طريقة النجوم القيفاوية في تحديد حجم وشكل مجرَّة درب التبانة نفسها، بعد أن أجرى عملية المعايَرة الخاصة به لسطوع هذه النجوم المتغيرة، وكان هذا العمل أساسَ مساهمتِه في المناظرة العظمى.

كان مفتاح عملية المسح التي أجراها شابلي لمجرَّة درب التبانة هو أنه كان قادرًا على استخدام النجوم المتغيِّرة من أجل قياس المسافات إلى المنظومات النجمية المعروفة باسم «العناقيد الكروية». وهذه العناقيد الكروية — كما يوحي اسمها — منظومات نجمية كروية الشكل، وقد تحتوي هذه العناقيد على مئات الآلاف من النجوم المنفردة، وفي قلب كل عنقود قد نجد ما يصل إلى ألف نجم محتشدة داخل فرسخ فلكي مكعب واحد، وهو ما يختلف بشدة عن الحال داخل المنطقة التي نسكنها من المجرَّة؛ حيث لا يوجد أي نجم قريب في نطاق فرسخ فلكي كامل من الشمس. تُرى العناقيد الكروية أعلى سطح مجرَّة درب التبانة وأسفله، وعن طريق قياس المسافات إليها، وجد شابلي أنها موزَّعة في حيِّز كروي من الفضاء مركزه نقطة تقع في اتجاه كوكبة الرامي (القوس)، لكنها تبعد آلاف الفراسخ الفلكية عنَّا؛ في منتصف حزمة الضوء المعروفة باسم الطريق اللبني أو درب التبانة. النتيجة المستخلصة هي أن هذه النقطة تمثِّل مركز مجرَّة درب التبانة، وأن مجموعتنا الشمسية تقع قرب حافة المجرَّة. وبحلول عام ١٩٢٠، كان شابلي قد توصَّل إلى تقدير يقضي بأن مجرَّة درب التبانة يصل قطرها إلى نحو ٣٠٠ ألف سنة ضوئية (نحو ١٠٠ كيلو فرسخ فلكي)، وأن الشمس تبعد عن مركز المجرَّة بنحو ٦٠ ألف سنة ضوئية (نحو ٢٠ كيلو فرسخًا فلكيًّا)، وقد عبَّر عن هذا في اجتماع واشنطن بقوله:

> إحدى تبعات النظرية العنقودية للمنظومة النجمية هي أن الشمس وُجِد أنها تقع على مسافة بعيدة للغاية من مركز «المجرَّة»، ويبدو أننا نقع قرب مركز عنقود محلي كبير أو سحابة من النجوم، لكن تلك السحابة تبعد ما لا يقل عن ٦٠ ألف سنة ضوئية عن المركز المجري.

في هذه الصورة، تراءى لشابلي والفلكيين ذوي التفكير المشابه أن السُّدم الحلزونية لا يمكن أن تكون مجرَّات أخرى على غرار مجرَّة درب التبانة. وكان منطقهم في هذا بسيطًا؛ فالحجم (الزاوي) الظاهري لأي جرم في السماء يعتمد على الحجم الخطي الحقيقي له وعلى المسافة بيننا وبينه؛ تمامًا بالطريقة عينها التي تبدو بها البقرة الحقيقية الواقفة في الجانب الآخَر من الحقل في حجم لعبة الأطفال التي تحملها في يدك. فإذا كانت السُّدم



شكل ١-١: توزيع العناقيد الكروية (ممثلة بالدوائر) على أحد جانبَي السماء يوضِّح أن الشمس تبعد كثيرًا عن مركز مجرَّة درب التبانة.

الحلزونية يبلغ قطرها هي أيضًا نحو ٣٠٠ ألف سنة ضوئية عرضًا، فمن شأن أحجامها الزاويَّة الضئيلة على السماء أن تضعها على مسافات قدرها ملايين عدة من السنوات الضوئية، وهو ما يبدو كبيرًا للغاية لدرجةٍ لا يمكن معها أن نتقبَّله بجدية. بدلًا من هذا، ذهب شابلي إلى أن السُّدم الحلزونية كانت إما منظومات من النجوم الآخذة في التكون داخل مجرَّة درب التبانة، وإما — على أقصى تقدير — توابع صغيرة لمجرَّة درب التبانة، أقرب إلى الجُزر مقارَنةً بقارة درب التبانة. وقد قال شابلي: «أميل إلى الاعتقاد بأنها لا تتألف من النجوم على الإطلاق، وإنما هي أجرام سديمية بحق.»

كذلك كان في جعبته دليل آخَر. كان أدريان فان مانين، الفلكي الهولندي الذي تصادف أنه صديق حميم لشابلي، قد زعم أنه قاس دوران العديد من السُّدم الحلزونية، وذلك عن طريق مقارنة صور ملتقطة بفاصل زمني قدره عدة سنوات. كان التأثير المقيس صغيرًا للغاية؛ ففي إحدى الحالات — حالة السديم المسمى M101 — قال فان مانين إنه قاس إزاحة قدرها ٠٫٠٢ ثانية قوسية؛ أي نحو ٠٫٠٠١ بالمائة من الحجم الزاوي للقمر كما يُرى من على الأرض. ومن الممكن تحويل أي دوران كهذا إلى سرعة خطية تتوافق مع المسافة التي يبعدها أي جزء من السديم عن مركز الدوران، وهذا بطبيعة الحال يعتمد على الحجم الفعلي للجرم الذي يدور. وإذا كانت السُّدم الحلزونية في نفس حجم مجرَّة درب التبانة، فمن شأن قياسات فان مانين أن تعني تحرُّكها بسرعةٍ تقارِب سرعة الضوء

أو تزيد عنها، وإذا كان فان مانين مصيبًا، فلا بد أن هذه السُّدم الحلزونية أجرام صغيرة، وقريبة نسبيًّا منا. وقد وجد معظم الفلكيين صعوبةً في تقبُّل فكرة أن يتمكَّن فان مانين بالفعل من عمل هذه القياسات الدقيقة حقًّا، وبيَّنَتْ دراسات لاحقة أن فان مانين ارتكب خطأً — لا أحد يعلم تحديدًا كيف وقع فيه — لكن في وقت المناظرة العظمى كانت مسألة تصديق المعطيات أو عدم تصديقها مسألة ثقة في المقام الأول، وكان شابلي يثق بصديقه. وقد أكَّدَ شابلي في ورقته البحثية المنشورة عام ١٩٢١ على أن نتائج فان مانين «تبدو قاتلة» لفكرة الجزر الكونية؛ إذ إن «السُّدم الحلزونية الساطعة من غير المعقول أن تكون تلك الأجرامَ البعيدة للغاية التي تتطلبها هذه النظرية.»

لم يثق كيرتس في نتائج فان مانين، ولم يثق أيضًا في مقياس مسافات النجوم القيفاوية الجديد وقتها. وفي اجتماع واشنطن، قدَّمَ كيرتس ملخصًا للعديد من التقديرات المبكرة لحجم المجرَّة، بما في ذلك — بنوع من الوقاحة — التقدير الذي خرج به شابلي نفسه عام ١٩١٥، والقائل بأن قطر المجرَّة يبلغ ٢٠ ألف سنة ضوئية فقط. وقد خلص كيرتس إلى أن «القطر المجري الأقصى البالغ ٣٠ ألف سنة ضوئية يُفترض أنه يمثِّل على نحو طيب النظرة القديمة، بل ربما يكون أكبر من اللازم.» هذا التقدير كان بالضبط عُشْر ذلك التقدير الذي اقترحه شابلي عام ١٩٢٠. قال كيرتس أيضًا إن الشمس تقع «على مقربة من» مركز المجرَّة، لكن ليس في المركز بالضبط. لكن كل هذا كان — من وجهة نظره — أمرًا ثانويًّا ذكره في إيجازٍ قبل أن يناقش جانب القصة الذي يثير اهتمامه حقًّا؛ وهو طبيعة السُّدم الحلزونية والمسافة بيننا وبينها.

هناك حقيقتان أساسيتان استخدمهما كيرتس في تأييد وجهة نظره القائلة بأن السُّدم الحلزونية هي مجرَّات تشبه مجرتنا، وأنها تقع على مسافات كبيرة منَّا. كانت الحقيقة الأولى هي ذلك الاكتشاف الذي جرى على يد فيستو سليفر، من مرصد لويل، والذي قضى بأن كلَّ السُّدم الحلزونية — إلا ما ندر — تبتعد عنَّا بسرعات عالية. وقد جرى هذا الاكتشاف عن طريق قياس المدى الذي تُزاح به خطوط الطيف الخاصة بهذه السُّدم نحو الطرف الأحمر من الطيف، مقارَنةً بخطوط الضوء الصادر عن النجوم القريبة والأجسام الحارة على الأرض.

من الممكن تحليل الضوء الصادر عن أي جسم ساخن، بما في ذلك الشمس والنجوم، إلى الألوان المكوِّنة له بواسطة موشور من أجل إنتاج نمط قوس قزح، أو الطيف. وكل عنصر كيميائي — كالهيدروجين والكربون وغيرهما — ينتج نمطًا مميزًا من الخطوط

الساطعة في الطيف، وهو نمط مميز خاص به، أشبه بالكود الشريطي الموضوع على المنتجات في المتاجر، وحين يتحرك الجسم مبتعدًا عنَّا، يُزاح نمط الخطوط بأكمله ناحية الطرف الأحمر من الطيف، بمقدارٍ يعتمد على السرعة التي يبتعد بها الجسم عنَّا، وهذه هي «الإزاحة الحمراء» الشهيرة. وعلى نحوٍ مشابه، حين يقترب أيُّ جسم منَّا، يُزاح نمط الخطوط نحو الطرف الأزرق من الطيف، وهذه هي «الإزاحة الزرقاء». النجوم المتحركة حولنا في المجرَّة تُظهِر إزاحات حمراء وزرقاء، بالتوافق مع سرعاتها بالنسبة لنا أيًّا كانت؛ بدايةً من الصفر إلى بضع عشرات الكيلومترات في الثانية.

في العقد الثاني من القرن العشرين كان قياس مواضع الخطوط الموجودة في أطياف الضوء الباهتة الآتية من السُّدم الحلزونية يدفع تقنيات التصوير إلى أقصى حدودها. وفي عام ١٩١٢ تمكَّنَ سليفر من الحصول على تحليلات الطيف الخاصة بسديم أندروميدا، المعروف أيضًا باسم مجرَّة أندروميدا (المرأة المسلسلة) أو المجرَّة M31، والمعروف الآن بأنه أقرب مجرَّة حلزونية إلى درب التبانة. وقد وجد سليفر إزاحةً ناحية الطرف الأزرق من الطيف، وهو ما يشير إلى أن ذلك السديم كان يُسرِع في الاقتراب منَّا بسرعة قدرها ٣٠٠ كيلومتر في الثانية. كانت هذه أعلى سرعة جرى قياسها حتى ذلك الوقت بمراحل. وبحلول عام ١٩١٤ كان لدى سليفر تحليلات طيف مشابهة لخمسة عشر سديمًا، لم يُظهِر منها إزاحةً زرقاء سوى سديمين فقط — منهما سديم أندروميدا — أما السُّدم الثلاثة عشر الأخرى فقد أظهرت جميعًا إزاحات حمراء؛ من بينها إزاحتان توافَقَتا مع سرعة تراجع تزيد على الألف كيلومتر في الثانية. وبحلول عام ١٩١٧، كان لديه ٢١ إزاحة حمراء، لكنْ ظلَّ عدد الإزاحات الزرقاء كما هو — اثنين فقط — حتى يومنا هذا، ولا تزال هاتان الإزاحتان الزرقاوان هما الموجودتين فقط. بغض النظر عن طبيعة السُّدم الحلزونية، فإن السرعات التي قاسها سليفر تعني أنها لا يمكن أن تكون جزءًا من مجرَّة درب التبانة؛ إذ إنها تتحرك بسرعة كبيرة للغاية بما يستحيل معه أن تكون واقعة داخل قيود الجاذبية الخاصة بمجرتنا. ومع أنه في عام ١٩٢٠ لم يكن بمقدور أحدٍ أن يفسِّر سبب سرعات التراجع الكبيرة هذه، فإن كيرتس رأى فيها دليلًا على أن السُّدم الحلزونية ليس لها أي ارتباط بمجرَّة درب التبانة، وإنما هي «جزر كونية» مستقلة بذاتها.

الدعامة الأخرى التي استند إليها كيرتس كانت المشاهدات الخاصة بنجوم تضيء على نحوٍ مفاجئ في انفجارات ساطعة، هذه النجوم معروفة باسم المستعرات أو novae بالإنجليزية — وهي كلمة مشتقة من كلمة لاتينية بمعنى «جديد»؛ لأنه حين رُصِدت هذه

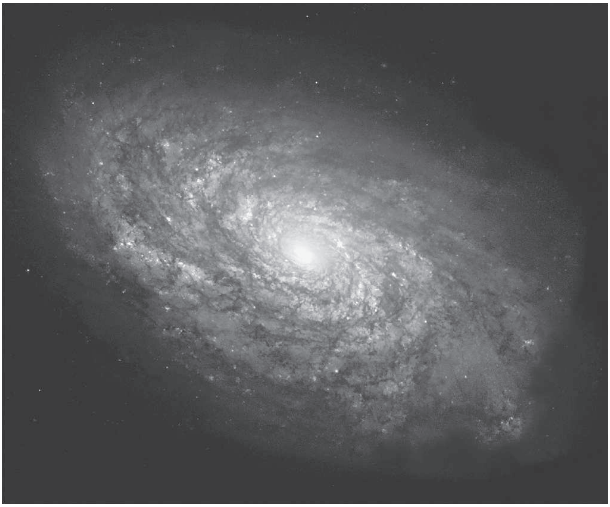
النجوم لأول مرة بَدَتْ فعليًّا كأنها نجوم جديدة — تسطع بشدة في مواضع لم يُرصَد بها أي نجوم من قبلُ. لكن من الواضح الآن أن هذه المستعرات هي انفجارات لنجوم كانت فيما سبق تحيا حياة هادئة، وكانت خافتة إلى درجة يتعذَّر معها رؤيتها؛ فهي ظواهر نجمية طبيعية، وإن كانت نادرة الحدوث إلى حدٍّ ما.

في عام ١٩٢٠ أوضح كيرتس أنه «خلال السنوات القليلة الماضية اكتُشِف نحو خمسة وعشرين نجمًا مستعرًا في السُّدم الحلزونية؛ ستة عشر منها في سديم أندروميدا، وذلك مقارنة بنحو ثلاثين نجمًا مستعرًا عبر تاريخ مجرَّة درب التبانة.» إن عدد المستعرات المرصودة في سديم أندروميدا وحده يعني أن هذا السديم يتألَّف من عدد هائل من النجوم، وذلك بافتراض أن احتمالية أن يصير النجم نجمًا مستعرًا لا تزيد داخل سديم أندروميدا عنها داخل درب التبانة، وتقريبًا كان السطوع (أو الخفوت) الظاهري للمستعرات المرصودة في السُّدم المختلفة مقارِبًا لما يتوقَّعه المرء لو أنها كانت بالفعل بنفس درجة سطوع المستعرات في مجرَّة درب التبانة، لكنها تبعد عنَّا المسافة التي ذهب إليها كيرتس لو أن السُّدم الحلزونية كانت في نفس الحجم الذي قدَّرَه لمجرَّة درب التبانة.

لكن كانت هناك مشكلة واحدة؛ ففي عام ١٨٨٥، في العقد ذاته الذي تحدَّدَ فيه أن سديم أندروميدا سديم حلزوني، انفجَرَ نجم ساطع داخله. وقد بلغ السطوع الظاهري لهذا المستعر مقدارًا مساويًا للسطوع الظاهري لأي مستعر تقليدي في مجرَّة درب التبانة؛ وكان هذا يعني إما أن ذلك السديم كان في حقيقته جزءًا من درب التبانة، أو أنه — لو كان السديم بعيدًا كما ظنَّ كيرتس — كان نوعًا فائق القوة من المستعرات، يسطع كمليار شمس معًا، ويفوق سطوعه أيَّ مستعر آخَر رُصِد في درب التبانة في القرن التاسع عشر. مثَّل هذا الأمر صعوبةً لكيرتس، لكنه تحايَلَ على الأمر باقتراح أن هناك نوعين من المستعرات، أحدهما أشد سطوعًا بكثير من الآخَر. بَدَا هذا في نظر الجمهور وقتها نوعًا من المراوغة، لكننا نعلم الآن أن هناك بالفعل انفجارات نجمية بهذه الدرجة من السطوع، ويُطلَق عليها اسم المستعرات العظمى (سوبرنوفا)، ويمكنها أن تسطع لوقت وجيز بقدرٍ يماثل سطوع مليار شمس، بل في الواقع هي تسطع بمقدارٍ يساوي سطوع كل النجوم الأخرى الموجودة في المجرَّة مجتمعة معًا.

وقد لخَّصَ كيرتس حجته قائلًا:

> النجوم الجديدة المرصودة في السُّدم الحلزونية تبدو نتاجًا طبيعيًّا لطبيعة مجرَّاتها. والعلاقة بين النجوم الجديدة في السُّدم الحلزونية وبين تلك الموجودة



شكل ١-٢: مثال كلاسيكي لمجرَّة قُرصية. هذه هي المجرَّة التي تحمل الاسم NGC 4414، كما رصدتها الكاميرا الموجودة على تليسكوب هابل الفضائي المسمَّاة «كاميرا الحقل الواسع الكوكبية ٢».

> في مجرتنا، تشير إلى أن المسافة بينهما تتراوح بين ٥٠٠ ألف سنة ضوئية في حالة سديم أندروميدا، و١٠ ملايين سنة ضوئية أو أكثر في حالة السُّدم الحلزونية البعيدة ... وفي حالة كون هذه المسافات سليمة، تكون هذه الجزر الكونية في نفس نطاق الحجم الذي تقع فيه مجرتنا.

وفي ورقة بحثية نشرها كيرتس عام ١٩٢١، قال:

> إن السُّدم الحلزونية، بوصفها مجرَّات بعيدة، تشير إلى وجود كون أعظم، قد نمضي فيه إلى مسافات تتراوح بين عشرة ملايين ومائة مليون سنة ضوئية.

لم يحقِّق أيٌّ طرفٍ الفوزَ في المناظرة التي انعقدت بشأن حجم الكون في واشنطن في السادس والعشرين من أبريل عام ١٩٢٠. كان كلا المشاركَيْن يؤمن أنه خرج منها

فائزًا — وهي علامة أكيدة على أن كليهما لم يحقِّق الفوز — لكن كان كلاهما محقًّا في بعض النقاط ومخطئًا في نقاط أخرى. بادئ ذي بدء، كان شابلي محقًّا في وثوقه بمقياس المسافات المعتمِد على النجوم القيفاوية، حتى وإن كان هذا المقياس لم يصل إلى درجة الدقة المطلوبة في ذلك الوقت، وكان كيرتس محقًّا في أن السُّدم الحلزونية هي مجرَّات بالفعل. كان شابلي أيضًا محقًّا في وضع الشمس بعيدًا عن مركز مجرَّة درب التبانة، أما بشأن حجم مجرَّة درب التبانة فإن أفضل التقديرات الحالية تشير إلى أن قطرها يبلغ ١٠٠ ألف سنة ضوئية، وهو رقم أكبر بثلاث مرات من تقدير كيرتس، ويبلغ نحو ثلث الحجم الذي قدَّره شابلي؛ لذا يمكن القول إنهما كانا متعادلَيْن في هذا الصدد. وهذا في واقع الأمر يجعل من مجرَّة درب التبانة مجرَّة حلزونية عادية، وسأناقش في الفصل الرابع إلى أيِّ مدًى تُعَدُّ عادية بالفعل. ومع أن المناظرة العظمى لم تكن حاسمة، فإن القضايا الأساسية التي أثارتها حُلَّت قبل نهاية العقد الثالث من القرن العشرين، وذلك بالأساس بفضل أعمال رجل واحد هو: إدوين هابل.

الفصل الثاني

التقدُّم في فهمنا للكون

إن السبب الرئيس وراء الانطلاقة التي شهدتها دراسة المجرَّات في عشرينيات القرن العشرين هو اختراع تليسكوبات أكبر وطرقٍ تصويرية محسَّنة، وهو ما مكَّنَ من الحصول على صور (وأطياف) أكثر تفصيلًا للأجرام البعيدة الخافتة. وقد لعب التصوير الطيفي دورًا محوريًّا في اكتشاف الإزاحات الحمراء في الضوء القادم من السُّدم الحلزونية، وكان التصوير الفوتوغرافي العادي نفسه عنصرًا جوهريًّا في اكتشاف العلاقة بين دورة النجوم القيفاوية وسطوعها. وفي عام ١٩١٨، بدأ تليسكوبٌ ذو مرآة يبلغ قطرها مائة بوصة (٢٫٥ متر) العمل في مرصد ماونت ويلسون في كاليفورنيا، وظل أقوى تليسكوب على مستوى العالم لنحو ثلاثة عقود، وقد استخدمه إدوين هابل في قياس المسافات إلى المجرَّات في سلسلة من الخطوات عبر أنحاء الكون.

حصل هابل على أولى خبراته باعتباره باحثًا فلكيًّا خلال فترة تحضيره لدرجة الدكتوراه في مرصد يركيز (التابع لجامعة شيكاجو) بين عامَيْ ١٩١٤ و١٩١٧، وقد كان مشروعه البحثي هو الحصول على صور فوتوغرافية للسُّدم الخافتة باستخدام تليسكوب كاسر قطره ٤٠ بوصة (متر واحد). كان هذا أحد أعظم التليسكوبات في العالم في ذلك الوقت، وأكبر تليسكوبٍ كاسرٍ بُنِي على الإطلاق. وعمومًا، التليسكوب الكاسر الذي يستخدم عدسةً يكون أقوى من أي تليسكوب عاكس من نفس الحجم يستخدم مرآة، لكن من الممكن صنع تليسكوبات عاكسة أكبر حجمًا؛ لأن مراياها يمكن دعمها من الخلف دون أن يعيق ذلك أيَّ ضوء. وقد قاد هذا البرنامج الرصدي هابل إلى دراسة طبيعة السُّدم، وإلى تصنيف السُّدم بناءً على مظهرها، كما أقنعه هذا البرنامج بحلول عام ١٩١٧ بأن السُّدم الحلزونية العملاقة تحديدًا، من المؤكد أنها تقع خارج مجرَّة درب التبانة.

تأخَّر تطوير هذه الأفكار؛ لأنه ما إن أتم هابل رسالة الدكتوراه الخاصة به حتى تطوَّع للخدمة في الجيش الأمريكي، وذلك في أعقاب دخول الولايات المتحدة الحرب العالمية الأولى في أبريل عام ١٩١٧. وقد خدم هابل في فرنسا ووصل إلى رتبة رائد في الجيش؛ بَيْدَ أنه لم يشارك في أي معركة. وفي سبتمبر ١٩١٩ انضم هابل أخيرًا إلى طاقم العاملين بمرصد ماونت ويلسون، حيث كان أحد أوائل مَن استخدموا التليسكوب الجديد البالغ قطر مرآته ١٠٠ بوصة. أيضًا استغلَّ هابل الفرصة كي يطوِّر الأفكار المأخوذة من أطروحة رسالة الدكتوراه الخاصة به إلى نظام تصنيف كامل انتهى منه عام ١٩٢٣. كان هابل يستخدم عادة مصطلح «السُّدم» للإشارة إلى الأجرام التي كان يصفها؛ بَيْدَ أنه كان مقتنعًا أنها تقع خارج مجرَّة درب التبانة، وهو المعتقَد الذي أثبت صحته بعد وقت قصير، وتماشيًا مع التسمية الحديثة، سأطلق على هذه الأجرام اسم «المجرَّات». وأهم ما تكشَّفَ لنا من خلال أعمال هابل الأولى هو أن هناك في واقع الأمر أنواعًا مختلفة من المجرَّات، وما المجرَّات الحلزونية العملاقة إلا أكثر هذه المجرَّات وضوحًا للعيان.

وباستثناء العدد الصغير نسبيًّا من المجرَّات الصغيرة الحجم نسبيًّا ذات الشكل غير المنتظم على غرار سحابة ماجلان الصغرى (وشقيقتها الأكبر منها «سحابة ماجلان الكبرى»)، فإن المجرَّات جميعها يمكن تعريفها وفقًا لأشكالها. يُستخدَم مصطلح «المجرَّة البيضاوية» لوصف المجرَّات التي تتراوح بين الشكل الكروي وشكل العدسة المستطيلة، لكن ليس لها بنية داخلية واضحة. أما «المجرَّات الحلزونية» فقد تكون أذرعها مضمومة أو مفتوحة، وفي كلتا الحالتين قد تبدأ الأذرع من مركز المجرَّة، أو تبدو الأذرع كأنها متصلة بطرفَيْ قضيب من النجوم يمتد عبر مركز المجرَّة. ظنَّ هابل أن هناك تتابعًا تطوريًّا تبدأ فيه الأذرع المفتوحة للمجرَّة في الانغلاق تدريجيًّا، نتيجة للدوران، بحيث ينتهي الحال بالمجرَّة وهي مجرَّة بيضاوية، لكنه كان مخطئًا بالكامل في هذا الصدد، وإن لم يؤثِّر هذا على نظامه التصنيفي المبني على الشكل الظاهري للمجرَّات. ونحن الآن نعلم أن أكبر المجرَّات في الكون هي مجرَّات بيضاوية عملاقة، لكن بعض المجرَّات البيضاوية تكون أصغر من بعض المجرَّات الحلزونية، كما نعلم أيضًا أن بعض المجرَّات التي كنَّا نعتبرها «حلزونية» هي في الواقع منظومات قُرْصية الشكل من النجوم، وليست لها أذرع حلزونية يمكن تمييزها على الإطلاق! ولهذا السبب، من الأفضل أن نستخدم مصطلح «المجرَّة القُرْصيَّة»، الذي يضمُّ أيضًا تلك المجرَّات ذات الأذرع الحلزونية. لكن حتى وقتنا الحالي يستخدم العديد من الفلكيين مصطلح «المجرَّات الحلزونية» عند حديثهم عن مجرَّات قرصية عديمة الملامح فعليًّا.

لوقت وجيز، تزامن عمل هابل في مرصد ماونت ويلسون مع عمل هارلو شابلي، الذي ترك المرصد لتولِّي وظيفة في هارفرد في مارس ١٩٢١. وحين بدأ هابل استخدام التليسكوب ذي المرآة البالغ قطرها ١٠٠ بوصة في محاولةٍ لإثبات أن السُّدم التي كان عاكفًا على دراستها كانت مجرَّات أخرى، لم يكن شابلي الأكثر خبرةً موجودًا كي يعارِض هذا الأمر. وفي ضوء المشاهدات الدائمة التحسُّن، بدأت فكرة الجزر الكونية تحظى بالدعم في أوائل العشرينيات. كان فلكيٌّ دنماركيٌّ، هو كنوت لندمارك — الذي زار كلًّا من مرصد ليك ومرصد ماونت ويلسون في ذلك الوقت — قد حصل على صور فوتوغرافية للسديم (المجرَّة) المعروف باسم M33، وقد كانت هذه الصور كافيةً لإقناعه بأن المظهر الحُبَيْبي يوضِّح أن السديم كان مؤلَّفًا من نجوم، لكن هذا لم يُقنع شابلي. وفي عام ١٩٢٣، اكتُشِفت عدة نجوم متغيرة في السديم المسمى NGC 6822، لكن استغرق الأمر عامًا كاملًا حتى تمَّ تحديدُ أنها نجوم قيفاوية، وبحلول ذلك الوقت كان هابل قد حقَّق اكتشافه المهم للنجوم القيفاوية في المجرَّة M31، المعروفة باسم سديم أندروميدا.

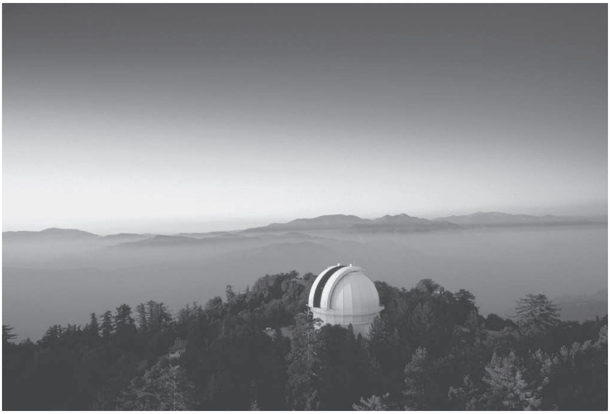
لم يكن هابل في واقع الأمر يبحث عن نجوم قيفاوية؛ فبعد اكتمال نظامه التصنيفي، تتبَّعَ هابل في خريف عام ١٩٢٣ واحدًا من الخطوط الأساسية التي تقوم عليها حُجَّة كيرتس، عن طريق البدء في سلسلة من المشاهدات المصورة فوتوغرافيًّا باستخدام التليسكوب ذي المرآة البالغ قطرها ١٠٠ بوصة، مستهدفًا اكتشاف المستعرات في إحدى الأذرع الحلزونية للمجرَّة M31. وعلى الفور تقريبًا، في الأسبوع الأول من أكتوبر ذلك العام، عثر هابل على ثلاث نقاط ساطعة من الضوء بدت كالمستعرات على لوح التصوير. ولأن التليسكوب ذا المرآة البالغ قطرها ١٠٠ بوصة كان يعمل قبلها لعدة سنوات، كان هناك بالفعل أرشيف للصور الفوتوغرافية، التي تضمَّنَتْ مشاهدات للجزء عينه من المجرَّة M31، حصل عليها راصدون متعددون، من بينهم شابلي وميلتون هيومايسون، الذي صار أقرب مساعِدِي هابل في السنوات التالية. وقد بيَّنَتْ هذه الألواح أن إحدى النقاط الساطعة التي حدَّدَها هابل مؤقتًا على أنها مستعرات كانت في واقع الأمر نجومًا قيفاوية، ذات دورة سطوع تزيد قليلًا عن ٣١ يومًا. وباستخدام معايرة شابلي لمقياس المسافات المعتمد على النجوم القيفاوية توصَّل هابل على الفور إلى أن المسافة تبلغ نحو مليون سنة ضوئية (٣٠٠ كيلو فرسخ فلكي)، وهو يفوق بثلاث مرات تقديرَ شابلي لحجم مجرَّة درب التبانة. خضع مقياس المسافات بأكمله للمراجعة في وقت لاحق، وهو ما يرجع جزئيًّا إلى المشكلات التي سبَّبَها الخمود النجمي، ونحن نعرف الآن أن المجرَّة

M31 تبعد في واقع الأمر نحو ٧٠٠ كيلو فرسخ فلكي؛ أي ما يعادل تقريبًا ٢٠ مرة قدر قطر مجرَّة درب التبانة. لكن ما كان يهم في عام ١٩٢٣ هو أنه بضربة واحدة — وفي أول مشاهداته تقريبًا لذلك السديم — بيَّنَ هابل أنه في حقيقة الأمر مجرَّة تشبه مجرتنا — مجرَّة درب التبانة — وتقع بعيدًا للغاية عنها.

وعلى مدار الشهور التالية عثر هابل على نجم قيفاوي آخَر وتسعة مستعرات في سديم أندروميدا، وكلها تقريبًا تقع على نفس المسافة، كما عثر على نجوم قيفاوية ومستعرات في سُدم أخرى، وقد وضع كل اكتشافاته في ورقة بحثية قُدِّمت إلى الاجتماع المشترك للجمعية الفلكية الأمريكية والرابطة الأمريكية لتقدُّم العلوم الذي عُقِد في واشنطن العاصمة في الأول من يناير ١٩٢٥. لم يكن هابل حاضرًا في هذا الاجتماع، وقرأ الورقة هنري نوريس راسل نيابةً عنه. ولم تكن هناك حاجة لحضور هابل شخصيًّا للدفاع عن آرائه؛ إذ أجمع الحاضرون في هذا الاجتماع على أن طبيعة السُّدم قد تحدَّدت أخيرًا، وأن مجرَّة درب التبانة ما هي إلا جزيرة واحدة تقع داخل كونٍ أكبر بكثير. وحتى قبل هذا الاجتماع كان هابل قد كتب إلى شابلي يخبره عن اكتشافاته، وقد تصادف أن كانت الفلكية سيسيليا باين-جابوشكين، التي كانت قد بدأت أبحاث الدكتوراه الخاصة بها تحت إشراف شابلي عام ١٩٢٣، موجودة في المكتب أثناء قراءة شابلي لخطاب هابل، وقد قال لها شابلي وهو يناولها الخطاب: «هذا هو الخطاب الذي دمَّرَ الكون كما تصورته.» لقد حُسِمت المناظرة العظمى. وقد يجد شابلي بعض العزاء في حقيقة أن استخدام هابل الناجح لطريقة النجوم القيفاوية منَحَ ثقلًا لنموذج شابلي لمجرَّة درب التبانة، وتحديدًا إزاحة الشمس من مركز مجرتنا.

لكن لو أن كون شابلي قد دُمِّر، فماذا كان شكل الكون الجديد؛ كون هابل؟ إن الكون كبير للغاية، لدرجة أنه باستخدام التليسكوب البالغ قطر مرآته ١٠٠ بوصة تمكَّنَ هابل فقط من الحصول على صور لنجوم قيفاوية فيما تبيَّنَ لاحقًا أنها مجرَّات مجاورة. كما كان الفلكيون العاملون بتليسكوبات أصغر يجدون معاناة أكبر في رصد الكون. ولما كان هابل مغرمًا — بل مهووسًا تقريبًا — بفكرة قياس حجم الكون، فقد تعيَّنَ عليه أن يجد طرقًا أخرى لقياس المسافات بيننا وبين المجرَّات الواقعة فيما وراء نطاق طريقة النجوم القيفاوية، وقد بدأ مسعاه في منتصف عشرينيات القرن العشرين.

أرسى هابل سلسلة من الخطوات التي يستطيع الراصدون استخدامها من أجل الوصول لمسافات أبعد وأبعد في الكون. كانت النجوم القيفاوية كافيةً فقط لتحديد



شكل ٢-١: قبة تليسكوب هوكر البالغ قطر مرآته ١٠٠ بوصة في مرصد ماونت ويلسون، والذي استخدمه إدوين هابل في قياس المسافات إلى المجرَّات.

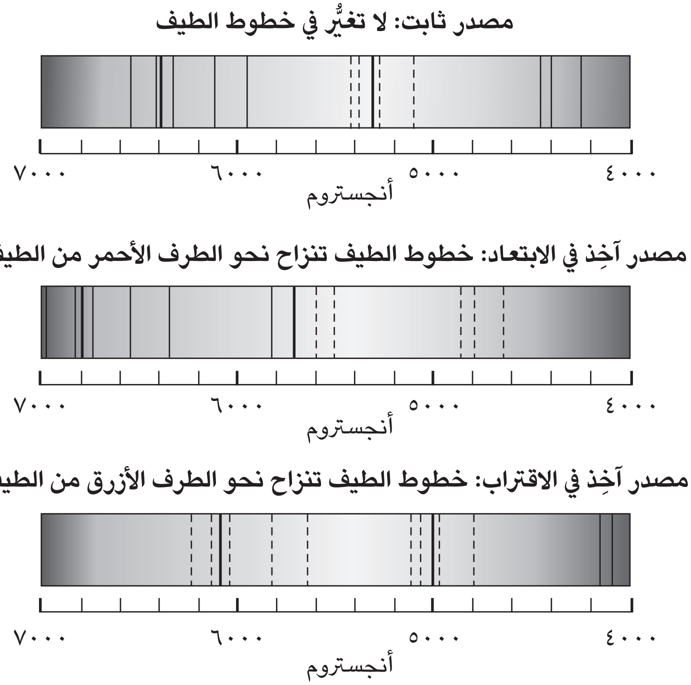
المسافات إلى عدد قليل من المجرَّات القريبة، لم يتجاوز عددها بضع عشرات قبل اختراع التليسكوب الفضائي الذي يحمل اسم هابل نفسه وأُطلق عام ١٩٩٠، أما المستعرات فهي أكثر سطوعًا من النجوم القيفاوية، ويمكن رؤيتها على مسافات أكبر. وما إن تم تحديد المسافة إلى المجرَّة M31 من خلال النجوم القيفاوية، استطاع هابل استخدام هذا في معايرة سطوع المستعرات المرئية في هذه المجرَّة؛ ومن ثَمَّ — بافتراض أن كل المستعرات لها السطوع الحقيقي نفسه — استخدَمَ مشاهدات المستعرات من أجل قياس المسافات إلى المجرَّات الأبعد قليلًا من ذلك. وبفضل قدرة التليسكوب البالغ قطر مرآته ١٠٠ بوصة وما تلاه من تليسكوبات على تبيُّن النجوم المنفردة داخل المجرَّات القريبة، صارت طرق أخرى ممكنة. إن أشد النجوم سطوعًا داخل المجرَّات هي أيضًا أشد سطوعًا بكثير من النجوم القيفاوية، ومن الممكن استخدامها كمؤشرات للمسافة بالطريقة عينها، لكن في هذه المرة على افتراض أن أشد النجوم سطوعًا في أي مجرَّة سيكون في نفس مقدار سطوع أشد النجوم سطوعًا في أي مجرَّة أخرى؛ نظرًا لأنه لا بد من وجود حدٍّ أقصى للسطوع الذي قد يبلغه أي نجم. تمكَّنَ هابل أيضًا من تحديد العناقيد الكروية في مجرَّات أخرى، والتخمين أن أشد العناقيد الكروية سطوعًا في أي مجرَّة لا بد من أن

يكون لها جميعًا نفس السطوع الحقيقي تقريبًا. ثم أُضِيفت لاحقًا المستعرات العظمى إلى هذه السلسلة ما إن تفهَّمنا آلية عملها.

بُنِيت تقديرات أكثر جزافية على سطوع المجرَّات كلها، وعلى حجمها (الزاوي) الظاهري في السماء. فإذا كانت كل مجرَّة حلزونية في نفس درجة سطوع المجرَّة M31 وكلها في نفس حجمها، فسيكون من السهل قياس المسافات إليها عن طريق مقارَنة خصائصها المرصودة مع خصائص المجرَّة M31. لكن للأسف ليس هذا هو واقع الحال، وكان هابل يعلم ذلك، لكن في ظل افتقاد أي طريقة أخرى أفضل حاوَلَ هابل أن يقارن بين الخصائص المرصودة للمجرَّات التي بَدَتْ متماثلة في الحجم كي يحصل ولو على بعض الإرشاد بشأن مسافاتها.

ليس أيٌّ من هذه الطرق مثاليًّا، لكن هابل طبَّق — كلما استطاع — أكبرَ عدد من الطرق التي يمكنه تطبيقها لكل مجرَّة منفردة، على أمل الخلاص من أي أخطاء أو مواضع عدم يقين. استغرق كل هذا وقتًا طويلًا، لكن في عام ١٩٢٦ كان هابل قد بدأ في بناء صورة لتوزيع المجرَّات حول مجرَّة درب التبانة، وقد كان يملك ما يكفي تمامًا من البيانات كي يفكِّر في أن يأخذ قفزة عظيمة إلى المجهول عن طريق اتباع تلميح كان موجودًا بالفعل في بيانات الإزاحة الحمراء التي حصل عليها فيستو سليفر وقِلة من الأشخاص الآخرين.

بحلول عام ١٩٢٥، كشفت تحليلات الضوء القادم مما صار معروفًا وقتها أنه مجرَّات أخرى، عن وجود ٣٩ إزاحةً حمراء وإزاحتين زرقاوين فقط. في الواقع، كان سليفر أول شخص يقيس كل هذه الإزاحات خلا أربعًا منها؛ بَيْدَ أنه سريعًا ما وصل إلى حدود ما كان ممكنًا باستخدام التليسكوب الذي كان يستخدمه في مرصد لويل، وهو تليسكوب كاسر يبلغ قطر عدسته ٢٤ بوصة (٦٠ سنتيمترًا)، بحيث انتهى الحال بثلاث وأربعين إزاحة. كان ثمة تلميح — بالكاد — يمكن استقاؤه من هذه البيانات؛ وهو أن الإزاحات الحمراء الأكبر كانت مرتبطة بالمجرَّات الأبعد. لاحَظَ كثيرون هذا، لكن هابل — الذي صار وقتها عالم فلك راسخ المكانة يستطيع استخدام أفضل تليسكوب في العالم — كان الرجل الموجود في المكان المناسب والوقت المناسب كي يحاوِل أن يثبت أن هذا هو الواقع بالفعل، وكان يطمح أن يجد ما يوضِّح إن كانت هناك علاقة دقيقة بين الإزاحات الحمراء والمسافات بحيث يمكنه استخدامها كخطوة أخيرة في سلسلته، بحيث يستطيع قياس المسافات عبر الكون فقط من خلال قياس الإزاحات الحمراء.



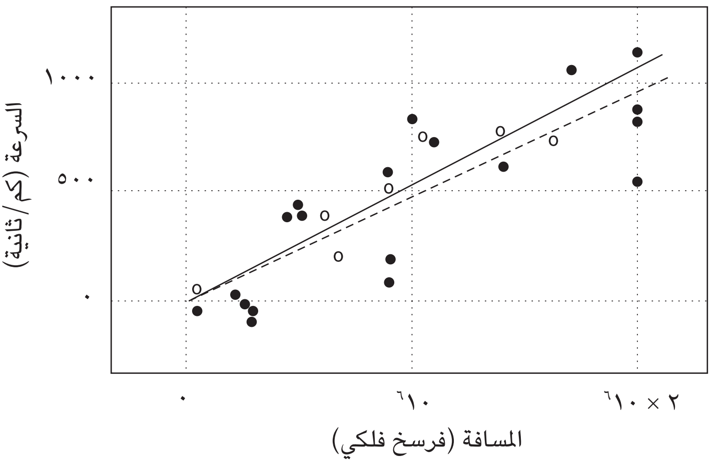
شكل ٢-٢: سرعة واتجاه حركة النجوم نسبةً إلى الراصد يحدِّدان المقدار الذي ينزاح به الشريط في الطيف. حين يأخذ جسم مشع في الابتعاد عن الراصد، تصير الموجات المنبعثة منه «ممطوطة»؛ ومن ثَمَّ تطول الأطوال الموجية، وتنزاح خطوط الطيف نحو الطرف الأحمر من الطيف. وإذا كان الجسم آخِذًا في الاقتراب، ينضغط الطول الموجي، وتنزاح الخطوط نحو الطرف الأزرق من الطيف. ومن الممكن استخدام الإزاحات الحمراء في حساب سرعة تراجع الجسم.

عام ١٩٢٦ بدأ هابل عامدًا البحث عن رابط بين الإزاحات الحمراء والمسافات إلى المجرَّات. كان لديه بالفعل العديد من المسافات، وكان في سبيله لتحديد المزيد منها عبر الأعوام التالية، إلا أن التليسكوب البالغ قطر مرآته ١٠٠ بوصة لم يكن قد استُخدِم من قبلُ في رصد الإزاحة الحمراء، وكان هابل بحاجة إلى زميل قادر على — وراغب في — إعداد التليسكوب من أجل هذه المهمة الشاقة، ثم القيام بالقياسات المجهدة الدقيقة.

وقد اختار ميلتون هيومايسون، وهو راصد رائع لكنه أقل مكانةً بوضوح من هابل، حتى يكون واضحًا للعالم الخارجي أيهما قائد الفريق. وبعد الكثير من العمل الشاق من أجل تكييف التليسكوب مع دوره الجديد، تعمَّدَ هيومايسون أن يختار لأوَّل قياسات الإزاحة مجرَّةً خافتة للغاية بما يستحيل معه أن يكون سليفر قد درسها بهذه الطريقة. وقد حصل هيومايسون على إزاحة تتوافق مع سرعةٍ مقدارها نحو ثلاثة آلاف كيلومتر في الثانية؛ أي أكبر من ضعفَيْ أيِّ إزاحة حمراء رصدها سليفر. كانت زمالة هابل وهيومايسون مُثمِرةً بحق.

وبحلول عام ١٩٢٩، صار هابل مقتنعًا بأنه وجد العلاقة بين الإزاحات الحمراء والمسافة. ليس هذا فحسب، بل إن هذه العلاقة كانت أبسط علاقة كان يأمل في العثور عليها؛ إذ تتناسب الإزاحة الحمراء طرديًّا مع المسافة، أو كانت المسافة — بالتعبير عن الأمر بالصورة التي كانت تهمُّ هابل — تتناسب طرديًّا مع الإزاحة الحمراء. فالمجرَّة التي تفوق إزاحتها الحمراء إزاحة مجرَّة أخرى بمقدار الضعف، تقع ببساطة على مسافة مضاعفة مقارَنةً بهذه المجرَّة الأقرب. حملت أولى نتائج التعاون، والمنشورة عام ١٩٢٩، البيانات الخاصة بأربع وعشرين مجرَّة فقط، كان كلٌّ من إزاحاتها الحمراء ومسافاتها معروفة، ومنها حسب هابل أن ثابت التناسب للعلاقة الطردية بين الإزاحة الحمراء والمسافة يبلغ ٥٢٥ كيلومترًا في الثانية لكلِّ ميجا فرسخ فلكي، ويعني هذا أن أي مجرَّة ذات إزاحة حمراء تتناسب مع سرعةٍ مقدارها ٥٢٥ كيلومترًا في الثانية ستكون على بُعد مليون فرسخ فلكي (٣٫٢٥ ملايين سنة ضوئية) عنَّا، وهكذا دواليك. بَدَا اختيار مثل هذا الرقم المحدَّد اختيارًا اعتباطيًّا متفائلًا؛ لأن المقدار المحدود من البيانات لم يكن في واقع الأمر كافيًا لتبرير دقة هذا الرقم. لكن في عام ١٩٣١ نشر هابل وهيومايسون معًا ورقةً بحثية حدَّثَا فيها هذه النتائج مع إضافة خمسين إزاحة حمراء أخرى، وصولًا إلى مسافة تكافئ سرعةً مقدارها ٢٠ ألف كيلومتر في الثانية، وبما يتناسب مع الرقم الذي توصَّلَ له هابل قبل ثلاث سنوات على نحوٍ أقرب. ومن الجلي أن هابل كان يملك بالفعل بعضًا من هذه البيانات في عام ١٩٢٩؛ بَيْدَ أنه اختار — أيًّا ما كانت الأسباب — ألَّا ينشرها وقتها.

لم يكن هابل يعلم سببَ العلاقة بين الإزاحة الحمراء والمسافة، ولم يكن يهتم بذلك السبب أيضًا، بل إنه لم يزعم حتى أنها كانت تعني بالتبعية أن المجرَّات الأخرى كانت آخِذة في الابتعاد عنَّا. ومع أن الإزاحات الحمراء يُعبَّر عنها تقليديًّا بوحدات من



شكل ٢-٣: كان المخطط الأصلي الذي وضعه هابل للعلاقة بين الإزاحة الحمراء والمسافة مبنيًّا على تفسيرٍ متفائلٍ نوعًا ما للبيانات المنشورة في عام ١٩٢٩، وبحلول عام ١٩٣١ قدَّمَ عملُه مع هيومايسون صورةً أكثر إقناعًا.

الكيلومترات في الثانية، فإن ثمة سبلًا أخرى خلاف الحركة في الفضاء من المعروف أنها تنتجها (على سبيل المثال، مجال جاذبية قوي)، وكان هابل حريصًا على التفكير في أن عمليات غير معروفة في ثلاثينيات القرن العشرين ربما كانت ذات تأثير. وقد كتب في كتابه «عالم السُّدم» قائلًا:

> قد يُعبَّر عن الإزاحات الحمراء على مقياس السرعات على سبيل الملاءمة. فهي تسلك سلوك إزاحات السرعة وتُمثَّل ببساطة شديدة على نفس المقياس المألوف «بغضِّ النظر عن تفسيرها النهائي». ويمكن أن يُستخدَم مصطلح «السرعة الظاهرية» في عبارات مدروسة بحرصٍ، وتُفهَم هذه الصفة ضمنًا حين تُحذَف في الاستخدام العام. (التنصيص الوارد في الاقتباس هنا مضاف من جانبي.)

ومهما كان أصل العلاقة بين الإزاحة الحمراء والمسافة، فقد صارت هذه العلاقةُ الأداةَ المثالية لقياس حجم الكون، وصار ثابتُ التناسب معروفًا باسم «ثابت هابل» أو H.

ومنذ عام ١٩٣١، بات هدفُ كلِّ عمليات القياس التي جرَتْ خارج حدود مجرَّة درب التبانة هو ببساطة معايرة ثابت هابل. لكن قبل النظر إلى تبعات كل هذا على فهمنا للمجرَّات وموضعها في الكون إجمالًا، يبدو من الملائم تلخيص فهمنا الحالي لموطننا في الفضاء؛ مجرَّة درب التبانة، تلك المجرَّة الحلزونية العادية.

الفصل الثالث

جزيرتنا الكونية

منذ العشرينيات من القرن العشرين وفهمُنا لمجرَّة درب التبانة يزداد بدرجة كبيرة، وهو ما يرجع بالأساس إلى التطوير المتواصل لطرق وتقنيات الرصد؛ فبالإضافة إلى امتلاكنا تليسكوبات أكبر وأفضل لرصد الضوء المرئي (بما في ذلك تليسكوب هابل الفضائي)، فإننا نملك بيانات حصلنا عليها من التليسكوبات الراديوية، العاملة في نطاق الأشعة تحت الحمراء من الطيف، ومن لاقطات الأشعة السينية وغيرها من المعدات المحمولة إلى الفضاء على متن الأقمار الصناعية. إن اللاقطات الإلكترونية الحساسة قادرة على الحصول على معلومات أكثر بكثير عن مصادر الضوء الخافت مقارَنَةً بما هو متاح من الصور الفوتوغرافية أو أنواع معدات التحليل الطيفي الموجودة على متن التليسكوب هابل وأشباهه، وقوة أجهزة الكمبيوتر الحديثة تجعل عمليةَ مقارَنَةِ التنبؤات النظرية بالمشاهدات عمليةً أيسرَ بكثير مما كان الحال عليه في وقت هابل نفسه.

وكان أهم اكتشاف توصَّلنا إليه بشأن مجرَّة درب التبانة منذ عشرينيات القرن العشرين هو أن كلَّ النجوم الساطعة إنما تؤلِّف نسبة ضئيلة من إجمالي الكتلة الموجودة في المجرَّة. فمن الطريقة التي تدور بها المنظومة كلها، من الجلي أن القرص الساطع أسير قبضة الجاذبية الخاصة بهالة شبه كروية من مادة مظلمة تفوق كتلتُها بسبع مرات كلَّ ما ظنَّ هابل أنه يؤلِّف مجرَّة درب التبانة إجمالًا. ولهذا الأمر تبعات عميقة على فهمنا للكون عمومًا؛ نظرًا لأن نفس النسبة بين المادة العادية والمادة المظلمة يبدو أنها تنطبق على الكون بأسره. وقد ناقش بيتر كولز هذه التبعات الكونية في كتاب «علم الكونيات: مقدمة قصيرة جدًّا» الصادر عن نفس السلسلة. لكن أهم نقطة، إلى جانب وجود المادة المظلمة نفسها، هي أن هذه المادة ليست مجرد غاز بارد أو غبار؛ فهي لا تتألَّف من نفس نوعية الجسيمات — الذرات وغيرها — التي تتألَّف منها الشمس والنجوم، أو

حتى التي نتألف منها نحن البشر، وإنما تتألف من شيء آخَر مختلف تمامًا. وبما أنه لا أحدَ يعرف تحديدًا ماهية هذه المادة، فإنه يُشار إليها ببساطة بالاسم: «المادة المظلمة الباردة».

شمسنا نجم عادي، وبعض النجوم يحتوي على كتلة أكبر من كتلة شمسنا، وبعضها أقل، لكن النجوم جميعًا تعمل بالطريقة عينها؛ إذ تحوِّل العناصر الخفيفة (الهيدروجين تحديدًا) إلى عناصر أثقل (الهليوم تحديدًا) بداخلها عن طريق عملية الاندماج النووي، مُطلِقةً الطاقةَ التي تحافظ على سطوع النجم. وإجمالًا، يُقدَّر أن هناك عدة مئات الملايين من النجوم (ما لا يقل عن ثلاثمائة مليون نجم) في مجرَّة درب التبانة، وهي منتشرة عبر قرص يبلغ قطره نحو ٢٧ كيلو فرسخًا فلكيًّا (ما يربو قليلًا على ٩٠ ألف سنة ضوئية). ثمة قدر من عدم اليقين بشأن الحجم الدقيق للمجرَّة (إذ من العسير قياس حجم الغابة وأنت داخلها)؛ لذا عادةً ما يُجبَر هذان الرقمان إلى ٣٠ كيلو فرسخًا فلكيًّا و١٠٠ ألف سنة ضوئية. ثمة تركيز كبير للنجوم في مركز القرص، وهذا ما يجعله يبدو — إذا نُظِر إليه من الخارج من جهة الحافة الجانبية — كأنه بيضتان مقليتان ملتصقتان ظهرًا بظهر. القرص كله محاط بهالة كروية من النجوم القديمة والعناقيد الكروية، التي تحتوي أقدم النجوم في المجرَّة. هناك نحو ١٥٠ عنقودًا كرويًّا معروفًا، ولا بد أن هناك نحو ٥٠ عنقودًا آخَر أو نحو ذلك لا يمكننا رؤيتها؛ لأن شريط الضوء الساطع لمجرَّة درب التبانة يوجد بيننا وبينها.

يستطيع الفلكيون دراسةَ الطريقة التي تتحرك بها النجوم في الفضاء باستخدام تأثير دوبلر، وهذا التأثير يسبِّب إزاحةَ خطوطِ الطيف الخاصة بنجمٍ ما نحو الطرف الأحمر من الطيف إذا كان النجم آخِذًا في الابتعاد عنَّا، ونحو الطرف الأزرق إذا كان آخِذًا في الاقتراب منَّا، وحجم التأثير يكشف لنا سرعة النجم. وهذا الأمر مكافئ تمامًا للطريقة التي ينخفض بها الصوت الصادر عن مصدر متحرك — بوق سيارة إسعاف مثلًا — إذا كان المصدر آخِذًا في الابتعاد عنَّا، ويرتفع إذا كان آخِذًا في الاقتراب منَّا. وقد تنبَّأ كريستيان دوبلر بهذا التأثير عام ١٨٤٢، ثم قاسه من خلال جعل مجموعة من عازفي البوق يعزفون نغمة ثابتة وهم على متن قطار يتحرك بهم أمامه. من الظاهر، يبدو هذا التأثير مشابِهًا لتأثير الإزاحة الحمراء الذي رأيناه في الضوء الصادر عن المجرَّات؛ بَيْدَ أن الإزاحة الحمراء الكونية لا تسبِّبها الحركة داخل الفضاء؛ ومن ثَمَّ هي ليست تأثيرَ دوبلر.



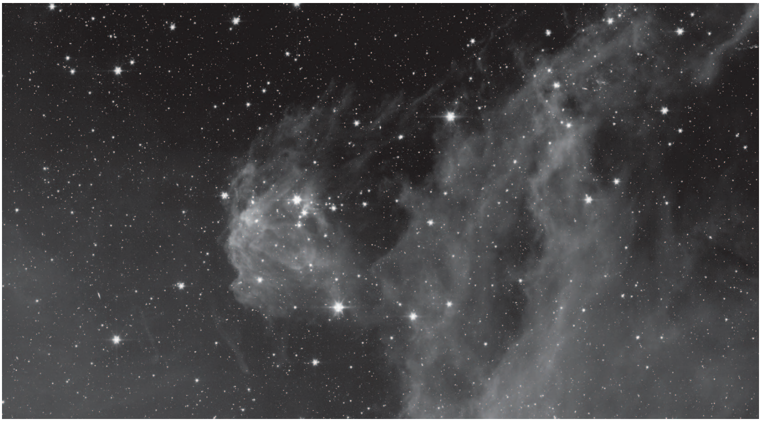
شكل ٣-١: مجرَّة الانفجار النجمي M82. هذه صورة مركبة تجمع بين البيانات التي أتى بها كلٌّ من كاميرا «الحقل الواسع الكوكبية ٢» والتليسكوب البالغ قطر مرآته ٣٫٥ أمتار الموجود في كيت بارك بالولايات المتحدة.

تقع الشمس على بُعْد ثلثَي المسافة (أقل قليلًا من ١٠ كيلو فرسخ فلكي) بين مركز مجرَّة درب التبانة وحافة القرص المرئي. ومثل النجوم الأخرى الموجودة في القرص، تتحرك الشمس حول مركز المجرَّة بسرعة تناهز ٢٥٠ كيلومترًا في الثانية في مدارٍ شبه دائري، وتستغرق أقل من ٢٥٠ مليون عام لإكمال دورة واحدة. من الممكن تحديد أعمار النجوم من خلال مقارنة مظهرها الكلي (خاصة اللون والسطوع) بالنماذج النظرية الخاصة بالكيفية التي تتغير بها النجوم بينما تستهلك وقودها النووي، وفي حالة الشمس يتأكَّد هذا من خلال استخدام قياسات النشاط الإشعاعي في الصخور والنيازك من أجل

الاستدلال على عمر المجموعة الشمسية. يبلغ عمر الشمس والمجموعة الشمسية نحو ٤٫٥ مليارات عام، وهو ما يكفي لإكمال نحو عشرين دورة حول مركز المجرَّة، ومنذ أن ظهر أوائل البشر — «الإنسان العاقل» الحديث — على كوكب الأرض، لم تُكمِل المجموعة الشمسية إلا أقل من واحد على الألف من دورتها الحالية. أما أقدم النجوم عمرًا في المجرَّة فيبلغ عمره أكثر من ١٣ مليار عام؛ أي أكبر من عمر الشمس ثلاث مرات.

خارج الانتفاخ المركزي، لا يزيد سمك قرص المجرَّة على حوالي ٣٠٠ كيلو فرسخ فلكي (نحو ألف سنة ضوئية). تقع المجموعة الشمسية أعلى مركز سطح القرص بحوالي ٦ أو ٧ فراسخ فلكية فقط. وبالنظر إلى المجرَّة من أعلى فإن شكل المجرَّة الشبيه بالبيضة المقلية لا يشوِّهه إلا ذلك القضيب — البالغ طوله ٨ أو ٩ كيلو فرسخ فلكي — الممتد عبر المركز المنتفخ، لكن من الممكن تمييز أربع أذرع حلزونية متقاربة عن كثب تمتد من المركز إلى الخارج. وكما الحال في المجرَّات القرصية الأخرى، تكون الأذرع الحلزونية ساطعة؛ لأنها تحتوي على العديد من النجوم التي لا تزال في بدايات شبابها، وهذه النجوم كبيرة الحجم وساطعة أيضًا، وكلما كان النجم أكبر (أضخم)، تعيَّنَ عليه أن يحرق وقوده النووي بقوةٍ أكبر كي يحافظ على تماسكه ضد قوى الجاذبية، وأن يستنفد وقوده بشكل أسرع. إن الأذرع الحلزونية هي مواضع تكوُّنِ النجوم. والنجوم الأصغر حجمًا والأطول عمرًا كشمسنا، تتكون أيضًا في الأذرع الحلزونية؛ بَيْدَ أنها لا تَسطَع بقدر كبير. ومجموعتنا الشمسية تقع حاليًّا داخل نتوء أصغر من النجوم يُعرَف باسم «ذراع الجبار»، أو ببساطة «الذراع المحلية»، الذي يشكِّل جسرًا بين ذراعين رئيسيتَيْن. لقد كان شابلي محقًّا عندما ظنَّ أننا موجودون داخل تجمُّع محلي كبير من النجوم.

النجوم الشابة التي توجد بالأساس داخل الأذرع الحلزونية وسطح مجرَّة درب التبانة (وفي أقراص المجرَّات الأخرى) تُعرَف باسم «نجوم التصنيف ١»، والشمس تنتمي لهذه الفئة من النجوم، وهذه النجوم تحتوي على مواد مُعاد تدويرها من أجيال سابقة من النجوم، منها العناصر الثقيلة التي تتكوَّن منها الكواكب؛ ككوكب الأرض. أما النجوم الأقدم الموجودة داخل هالة المجرَّة، في العناقيد الكروية والانتفاخ المركزي، فتُعرَف باسم «نجوم التصنيف ٢»، وهذه النجوم الأقدم تميل إلى أن تكون أكثر احمرارًا من «نجوم التصنيف ١»، وقد تكوَّنَت هذه النجوم منذ فترات طويلة حين كانت المجرَّة فَتِيَّة، وهي تتركب في الأساس من الهيدروجين والهليوم البدائيَّيْن اللذين ظهَرَا من الانفجار العظيم الذي أذِنَ بمولد الكون. والعناصر الثقيلة الموجودة داخل «نجوم التصنيف ١» وداخل



شكل ٣-٢: منطقة تكوُّن النجوم داخل ذراع الجبار، صُوِّرَت بالأشعة تحت الحمراء بواسطة تليسكوب سبيتزر الفضائي.

أجسادنا تكوَّنَتْ في أجيال سابقة من النجوم. وتتألف المجرَّات البيضاوية بالأساس من «نجوم التصنيف ٢».

إذا لم يتم الحفاظ بصورة ما على النمط الحلزوني الذي يُرى في المجرَّات على غرار مجرَّة درب التبانة، فسريعًا ما يُطمَس — في غضون مليار عام تقريبًا — بينما تتحرك النجوم حول المجرَّة في مداراتها. لكن هذا النمط الحلزوني يستمر؛ لأنه عبارة عن موجة مِن تكوُّن النجوم تحافظ عليها سُحُب الغاز والغبار التي تتحرك حول المجرَّة في مداراتها الخاصة وتنضغط بينما تعبر الأذرع الحلزونية. فالنجوم الفَتِيَّة ببساطة هي الملمح الأوضح لموجة صدمية تتحرك حول المجرَّة، على نحوٍ أشبه بالموجة الصدمية الخاصة باختراق حاجز الصوت.

يُشبَّه الموقف هنا عادةً بحالة من الاختناق المروري تحدث على طريق سريع مزدحم حين تَشْغَل مركبةٌ كبيرة الحجم بطيئةُ الحركة الحارةَ الوسطى للطريق؛ فمع مجيء السيارات الأسرع من وراء المركبة الكبيرة، فإنها تُدفَع نحو الحارتين الخارجيتين مكوِّنة اختناقًا مروريًّا سريعًا ما يتبدَّد بعد تجاوز المركبة الكبيرة. يتحرك الاختناق المروري على امتداد الطريق السريع بسرعة ثابتة؛ بَيْدَ أنه في حالة تغيُّرٍ مستمر مع انضمام سيارات

جديدة من الخلف ومغادرة سيارات أخرى من الأمام. وبالطريقة عينها، تتحرك الذراع الحلزونية حول المجرَّة في سرعة ثابتة، لكن سُحُب الغاز والغبار تنضمُّ إليها على نحو مستمر، ثم تنضغط، ثم تمضي في طريقها. وبعض هذه السحب ينضغط إلى درجة كافية بحيث يطلق عملية تكوُّن النجوم، وهي عملية مستدامة ذاتيًّا.

لكن مع أن عملية تكوُّن النجوم مستدامة ذاتيًّا، فإنها ليست عملية بالغة الكفاءة؛ فلو أنها كانت كذلك لكانت مجرَّة درب التبانة بحلول وقتنا الحالي قد حوَّلت كلَّ ما بها من غاز وغبار إلى نجوم. في الواقع، فقط كمية تبلغ بضعة أضعاف المادة الموجودة في الشمس (بضع كتلٍ شمسية من المادة) هي التي يتم تحويلها إلى نجوم جديدة كلَّ عام في مجرتنا، وهذا يوازن على نحوٍ تقريبي مقدار المادة التي تتبدَّد في الفضاء حين تموت النجوم القديمة؛ وبذا تتواصل عمليات مولد النجوم وحياتها وموتها لمليارات عديدة من الأعوام في المجرَّة القرصية. هذا يعني أيضًا أن النجوم العديدة ذاتها لا بد من أنها قد وُلدت في فترة زمنية قصيرة حين تكوَّنت مجرَّة درب التبانة، قبل أن تستقرَّ. ومثل هذه الأحداث الرائعة، المعروفة باسم الانفجارات النجمية، تُرَى بالفعل في مجرَّات أخرى.

من الصعب على سحابة من الغاز والغبار أن تنهار (بمعنى أن تنضغط وتتكثَّف) كي تكوِّن نجمًا (أو عدة نجوم)؛ وذلك لسببين: الأول هو أن كلَّ السحب تدور حول نفسها — وإن كان الدوران بسيطًا — ومع انكماشها فإنها تدور أسرع، مقاوِمةً قوة الجاذبية؛ فلا بد أن تتفتت السحابة بحيث يتبدَّد زخمها الزاوي بصورةٍ ما. السبب الثاني هو أن السحابة المنهارة ستزداد حرارةً مع تحرُّر طاقة الجاذبية، وإن لم تتمكَّن من تشتيت هذه الحرارة بعيدًا، فإن هذا سيمنع أيَّ انهيار آخَر. تُحَلُّ مشكلة الزخم الزاوي من خلال تفتُّت السحابة إلى عدة نجوم، بحيث يتحوَّل الزخم الزاوي للسحابة إلى الزخم الزاوي للنجوم التي يدور بعضها حول بعض. وفي المتوسط، من بين كل ١٠٠ نظامٍ نجمي حديثِ المَوْلِد يَكون ٦٠ منها نظامًا ثنائيًّا و٤٠ نظامًا ثلاثيًّا. أما الشموس المنفردة — كشمسنا — فإنها طُرِدت في وقت لاحق من النظم الثلاثية التي تكوَّنت بهذه الطريقة. وتُحَل مشكلة الحرارة لأن السحب تحتوي على جزيئات كأول أكسيد الكربون، التي تسخن وتشع الحرارة بعيدًا في نطاق الأشعة تحت الحمراء من الطيف. لكن لا تزال عملية تكوُّن النجوم عمليةً صعبةً، ومن قبيل العجب أن هناك نجومًا تتكوَّن من الأساس.

تبدأ عملية تكوُّن النجوم في تجمُّعات كبيرة من الغاز، قد تمتد لآلاف الفراسخ الفلكية عرضًا، وتحتوي من المادة ما يفوق كتلة الشمس بعشرة ملايين مرة، وداخلها قد تبلغ السحابة الفردية بضع عشرات من الفراسخ الفلكية عرضًا، وتحتوي من المادة ما يفوق كتلة الشمس ببضع مئات آلاف المرات. وقد يأتي الانضغاط المبدئي الذي يسبِّب انهيار السحابة على الأرجح من انفجار لنجم ضخم؛ مستعر أعظم. إن الاضطراب الحادث داخل السحابة المنهارة يؤدِّي إلى تكوُّن قلوبِ نجومٍ يبلغ قطرها نحو خُمْس سنة ضوئية، تحتوي على نحو ٧٠ بالمائة من المادة التي تحتوي عليها شمسنا. لكنَّ نسبةً مئوية ضئيلة فقط من كتلة السحابة كلها يتمُّ تحويلها إلى قلوب نجمية بهذه الطريقة. فحين يتكوَّن أحد النجوم، فإنه يبدأ كقلب نجمي أصغر كثيرًا، ذي كتلة لا تزيد عن واحد على الألف من كتلة الشمس، ويصل إلى الكثافة اللازمة لتحويل نفسه إلى نجم. أما بقية كتلة النجم فتُضاف إليه مع انجذاب المادة الموجودة في السحابة المحيطة، والقريبة بما يكفي بحيث تنجذب بفعل جاذبيته إلى قلبه؛ وبذا تعتمد الكتلة النهائية للنجم على مقدار المادة الموجود في الجوار. وما إن يبدأ النجم في السطوع حتى يطرد الإشعاعُ الصادر عنه بقيةَ المادة المحيطة.

تنتهي العملية كلها بسرعة كبيرة، فتنهار إحدى السحب لتكوِّن نجومًا، وتطرد النجومُ الصغيرة الحارة المادةَ المتخلفة بحيث يتبقَّى عنقود من النجوم، وكل هذا يحدث في غضون عشرة ملايين عام. ومن الممكن رؤية المراحل الأخيرة من هذه العملية في سديم الجبار القريب، لكنَّ بعضًا من النجوم الشابة في بعض العناقيد سيكون أضخم كثيرًا من الشمس، وسيستهلك كلَّ وقوده النووي بسرعة كبيرة. وهذه هي النجوم التي تنتهي حياتها بالانفجار كمستعرات عظمى، مُرسِلةً موجات صدمية عبر المادة النجمية ومسبِّبةً انهيارَ سُحُب أخرى من الغاز والغبار. تبدو هذه العملية مستدامة ذاتيًّا بحيث تُبقي أي مجرَّة مثل مجرَّة درب التبانة في حالة ثابتة بفضل عملية تغذية راجعة سلبية. فإذا تكوَّنَ عدد أكبر من المتوسط من النجوم في أحد الأجيال أو المواضع فستبدِّد الطاقةُ الصادرة عنه الغازَ والغبار عبر منطقة واسعة، وهو ما يقلِّل من عدد النجوم في الجيل التالي، لكن فقط لو تكوَّن عدد قليل من النجوم فسيكون هناك من الغاز والغبار المتخلِّف ما يكفي لتكوين نجوم جديدة في المرة التالية التي تنضغط فيها السحابة، وهذه العملية تميل بصورة طبيعية إلى الارتداد إلى المتوسط. ولأن نوعية النجوم التي تكوِّن مستعرات عظمى تستنفد وقودها في ملايين قليلة من الأعوام (قارِنْ هذا بالأربعة مليارات ونصف

المليار عام التي مرَّت على شمسنا إلى الآن)، فإن كل هذا النشاط يحدث داخل نطاق الأذرع الحلزونية، وهو ما يساعد على استمرار النمط الحلزوني.

المنطقة المركزية لمجرتنا، التي يدور حولها النمط الحلزوني بأسره، تتجاوز كونها محض مركز رياضي للقرص؛ فهناك ثقبٌ أسود يحوي من الكتلة ما يفوق كتلة شمسنا بمقدار ٢٫٥ مليون مرة، قابعٌ في مركز مجرَّة درب التبانة، وكما سنرى في الفصل السابع فإن هذه الثقوب السوداء هي التي تحمل مفاتيح بقاء المجرَّات.

تركِّز أغلبُ التوصيفات الخاصة بالثقوب السوداء على تلك الثقوب الأصغر كثيرًا، التي لا تتجاوز كتلتها كتلة الشمس ببضع مرات. تتكون هذه الثقوب إذا كانت كتلة النجم عند نهاية حياته تزيد عن كتلة الشمس اليوم بنحو ثلاث مرات. وهذه الجمرة النجمية، التي لم تَعُدْ تولد حرارة في قلبها؛ نظرًا لاستنفاد كل وقودها، تعجز عن الحفاظ على تماسكها تحت وطأة وزنها؛ ومن ثَمَّ تنهار، وتنكمش (بما يتفق ونظرية النسبية العامة) وصولًا إلى نقطة ذات حجم صفري تُسمَّى نقطة التفرُّد، وخلال هذه العملية تنسحق الذرات والجسيمات المكوِّنة لها والبروتونات والنيوترونات والإلكترونات بحيث تفنى من الوجود. وعلى نحو شبه مؤكَّد، تنهار نظرية النسبية العامة قبل الوصول إلى نقطة التفرد، لكن قبل أن يحدث هذا بوقت طويل تصير قوة الجذب الخاصة بالجرم المنهار عاتيةً للغاية، لدرجة أنه لا شيء يمكنه الإفلات منها، ولا حتى الضوء؛ ومن هنا حصلت الثقوب السوداء على هذه التسمية. ومن طرق التفكير فيما يحدث داخل الثقوب السوداء القول بأن سرعة الإفلات من الثقب الأسود تتجاوز سرعة الضوء. وبما أنه لا شيء يمكنه التحرك بسرعة تفوق سرعة الضوء، فلا شيء إذن يمكنه الإفلات من الثقب الأسود.

في الواقع، يمكن لأي جرم أن يصير ثقبًا أسود لو أنه انضغط بالمقدار الكافي؛ إذ يوجد لأي مقدار من الكتلة نصف قطر حَرِج، يُسمَّى نصف قطر شفارتزشيلد، يحدث فيه هذا الأمر. بالنسبة للشمس، يقل نصف قطر شفارتزشيلد قليلًا عن ثلاثة كيلومترات، وبالنسبة للأرض فهو يقل عن سنتيمتر واحد. وفي كلتا الحالتين، إذا انضغطت الكتلة الكلية للجرم داخل حدود نصف قطر شفارتزشيلد، فسيصير الجرم ثقبًا أسود.

لكن مع أن الثقوب السوداء نفسها غير مرئية، فإنها تمارس تأثيرًا جذبيًّا على ما يحيط بها، وهذا يمكن أن يؤدِّي إلى نشاط عنيف سهل الرصد في المنطقة المحيطة بها. ونحن نعلم أن الثقوب السوداء النجمية موجودة بالفعل؛ لأن البعض منها يدور حول

نجوم عادية، مكوِّنًا نُظُمًا ثنائية. ويكشف التأثير المباشِر لجاذبية الثقب الأسود على المدار الثنائي للنجم رفيقِه عن كتلة الثقب الأسود، وتندفع المادة المسحوبة من النجم الرفيق نحو الثقب الأسود على نحوٍ حلزونيٍّ إلى «حلق» الثقب الأسود، وهناك تصير المادة الساقطة حارَّة بما يكفي بحيث تطلق أشعة سينية بينما تتسارع الجسيمات ويصطدم بعضها ببعض.

كل هذه الثقوب السوداء مرتبطة بمادة انضغطت إلى كثافات عالية للغاية، لكن الثقب الأسود الموجود في قلب المجرَّة يختلف. والعجيب أن هذه الثقوب السوداء الفائقة الضخامة هي أول ما أذكى فضول المنظِّرين قبل أن يأتي ألبرت أينشتاين بنظرية النسبية العامة بوقت طويل. ففي عام ١٧٨٣ أوضح جون ميتشل، زميل الجمعية الملكية، أنه وَفْق نظرية نيوتن للجاذبية فإن أيَّ جرم بقطر يزيد عن قطر الشمس بـ ٥٠٠ مرة (أي يساوي قطره قطر المجموعة الشمسية) لكنه في نفس كثافة الشمس؛ من شأنه أن تكون سرعة الإفلات الخاصة به أكبر من سرعة الضوء (لم يستخدم ميتشل مصطلح «سرعة الإفلات»، لكن باللغة المعاصرة هذا تمامًا هو ما كان يشير إليه، وبطبيعة الحال تصل نظرية أينشتاين إلى التنبؤ ذاته). وما من حاجةٍ لأن يتضمَّن هذا الأمر كثافات فائقة على الإطلاق؛ نظرًا لأن الكثافة الإجمالية للشمس تزيد بنحو مرة ونصف مرة فقط عن كثافة الماء. وقد وصل الفرنسي بيير لابلاس إلى النتيجة عينها على نحو مستقل عام ١٧٩٦، وعلَّقَ قائلًا إنه مع أن هذه الأجرام السوداء لا يمكن رؤيتها مباشَرةً مطلقًا، فإنه «إذا تصادَفَ دوران أي جرم ساطع آخَر حولها، فلربما نستنتج من واقع حركة هذه الأجرام الدوَّارة وجودَ الأجرام المركزية.» وبعدها بقرنين، كانت هذه بالضبط هي الكيفية التي اكتُشِف بها الثقب الأسود الموجود في مجرَّة درب التبانة.

يقع قلب مجرَّة درب التبانة في نفس اتجاه كوكبة الرامي (القوس) في السماء، لكن على مسافة أبعد بكثير. والكوكبات، التي حملت أسماءها في الأزمنة القديمة، هي أنماط من النجوم القريبة، التي تبدو ساطعة لأنها قريبة منَّا فحسب، ولا تزال أسماؤها تُستخدَم من جانب الفلكيين للإشارة إلى أجزاء السماء — الاتجاهات — التي يقع فيها جرمٌ ما؛ ولهذا السبب تُعرَف المجرَّة M31 أيضًا باسم سديم أندروميدا (أو مجرَّة أندروميدا)، حتى مع وقوعها على مسافة مليونَيْ سنة ضوئية من النجوم الموجودة في كوكبة أندروميدا، وليس لها علاقة على الإطلاق بها. وبالطريقة عينها، يُعرَف مصدرٌ قوي للضوضاء الراديوية في قلب مجرَّة درب التبانة باسم «الرامي أ»، مع أنه ليست له علاقة على الإطلاق بالنجوم الموجودة في كوكبة الرامي.

وقد صار من الممكن دراسة مركز مجرتنا حين صارت التليسكوبات الراديوية وغيرها من المعدات التي لا تعتمد على الضوء المرئي متاحةً؛ فهناك قدر كبير للغاية من الغبار الموجود في سطح مجرَّة درب التبانة، وهو المسئول عن ظاهرة الخمود النجمي التي أعاقت المحاولات المبكرة لتحديد مقياس المسافة، وهو الذي يوفِّر بعض المواد الخام للأجيال الجديدة من النجوم. وهذا الغبار يحجب الضوء المرئي، لكن الأطوال الموجية الأكبر تخترق هذا الغبار بسهولة أكبر؛ ولهذا السبب يصطبغ غروب الشمس باللون الأحمر؛ إذ يتشتَّت الضوء ذو الطول الموجي القصير (الأزرق) بعيدًا عن خط الرؤية بواسطة الغبار الموجود في الغلاف الجوي، بينما يَنفُذ الطول الموجي الأحمر الأطول منه وصولًا إلى أعيننا؛ ولهذا فإن فهمنا لمركز المجرَّة مبنيٌّ بالأساس على المشاهدات بالأشعة تحت الحمراء والأشعة الراديوية.

تبيِّن الدراساتُ الأكثر تفصيلًا أن الرامي «أ» يتكوَّن في الواقع من ثلاثة مكونات يقع بعضها على مقربة من بعض، أحد هذه المكونات فقاعةٌ متمددة من الغاز مرتبطة ببقايا أحد المستعرات العظمى، والثاني منطقة حارة متأيِّنة من غاز الهيدروجين، أما المكوِّن الثالث — المسمَّى «منطقة الرامي أ*» — فيقع في مركز المجرَّة ذاته.

بالتأكيد ثمة نشاط جمٌّ حول منطقة الرامي أ*. وتكشف دراسات الأشعة تحت الحمراء عن وجود عنقود كثيف من النجوم يحتشد فيه نحو ٢٠ مليون نجم من النجوم المماثلة لشمسنا داخل حيِّزٍ مقداره فرسخ فلكي واحد، وفيه تبعد النجوم بعضها عن بعض في المتوسط بمسافة تساوي ألف مرة فقط المسافة بين الأرض والشمس، وتحدث التصادمات بينها كلَّ مليون عام أو نحو ذلك. وهناك حلقة ضخمة من الغاز والغبار تحيط بهذا العنقود، وتمتد للخارج مسافةً يتراوح قدرها من نحو ١٫٥ فرسخ فلكي إلى ٨ فراسخ فلكية (نحو ٢٥ سنة ضوئية)، وبها آثار لموجات صدمية من أحداث انفجارية حديثة، وتتدفق الأشعة السينية — بل أيضًا أشعة جاما الأعتى نشاطًا — خارجةً من هذه المنطقة المركزية.

لكن مع كل هذه التقنيات المتقدمة، فإن أفضل الأدلة على وجود الثقب الأسود يأتي من نوعية الدراسات التي فكَّر فيها لابلاس؛ فالمشاهدات على الأطوال الموجية تحت الحمراء التي أُجرِيت بواسطة تليسكوبٍ ذي مرآة قطرها عشرة أمتار في مرصد مونا كيا في هاواي؛ منحتنا قياساتٍ للسرعة التي يتحرك بها نحو عشرين نجمًا قريبين من مركز المجرَّة. إن النجوم تدور حول مركز المجرَّة بسرعات تصل إلى ٩ آلاف كيلومتر في الثانية،

وهو ما يُترجَم إلى نحو ٣٠ مليون ميل في الساعة، وهي تتحرك بسرعة كبيرة، لدرجة أنه مع كونها بعيدةً عنَّا للغاية — بحوالي عشرة كيلو فرسخ فلكي — فإن الصور الملتقَطة على فترات تُقدَّر ببضعة أشهر على مدار بضعة أعوام تُظهِر تغيُّرَ مواضعها، وعن طريق وضع هذه الصور معًا يكون من الممكن صنع فيلمٍ يبيِّن في الواقع مداراتِ أكثر هذه النجوم عمقًا. وتخبرنا الحركة المدارية أن النجوم واقعة في قبضة جرمٍ ذي كتلة مقدارها ما بين مليونين إلى ثلاثة ملايين مرة قدر كتلة شمسنا. وبما أن هذه الكتلة منحصرة في حيِّزٍ من الفضاء لا يزيد عن قطر مدار الأرض حول الشمس، فمن المؤكد أن هذا الجرم هو ثقب أسود فائق الضخامة.

الثقب الأسود هادئ نسبيًّا في وقتنا الحالي؛ وذلك لأنه ابتلَعَ كل المادة الموجودة في المنطقة المحيطة به مباشَرةً. والنشاط الذي يمكننا رصدُه اليوم ينتج عن رذاذ من المادة يتجه نحو الثقب من حلقة المادة المحيطة به، وكل ما يحتاج إلى أن «يأكله» كلَّ عام كي يحافظ على مستواه الحالي من النشاط هو مقدارٌ من الكتلة يكافئ نحو واحدٍ بالمائة من كتلة شمسنا، وهو يُطلق طاقة جاذبية كلما سقطت المادة داخله. لكن من المؤكد أن الحال كان مختلفًا للغاية منذ وقت طويل، حين كانت المجرَّة شابَّة والمنطقة المحيطة بالثقب الأسود لم تكن قد أُخلِيت بعدُ من الغاز والغبار. سأناقش هذا الأمر في موضع لاحق، لكن من الجلي أن الثقوب السوداء الفائقة الضخامة هي البذور التي نَمَتْ منها المجرَّات.

يمكن أيضًا للطريقة التي تتحرك بها النجوم على مبعدة من مركز المجرَّة أن تخبرنا شيئًا عن الطريقة التي صارت بها مجرَّة درب التبانة على ما هي عليه اليوم؛ فالبنية المنظمة التي وصفناها إلى الآن — بما فيها من مكوِّنات على غرار الانتفاخ المركزي والقرص والهالة — ليست القصةَ كلها. وحين ينظر الفلكيون بالتفصيل إلى تركيب النجوم المنفردة والطريقة التي تتحرك بها، فإنهم يجدون أنه على خلفية النجوم العديدة التي تتحرك معًا في مجرَّة درب التبانة يمكنهم تبيُّن تيارات رفيعة من النجوم بعضها له تركيب مشابِه لبعض — يختلف عن النجوم الموجودة في الخلفية — وهي تتحرك في الاتجاه عينه بعضها مع بعض، وبزاوية حركة مائلة على أغلب النجوم في ذلك الجزء من السماء.

حُدِّدت تسعة أو عشرة من هذه التيارات إلى الآن (يعتمد الرقم الدقيق على رأيك في مدى موثوقية الأدلة)، وهناك المزيد ينتظر اكتشافه. وهي تتراوح في كتلتها من بضعة

آلاف إلى مائة ألف مليون كتلة شمسية من المادة، وفي الطول من ٢٠ ألفًا إلى مليون سنة ضوئية. وفي أحيانٍ كثيرة يمكن تبيُّن أن هذه النُّظُم النجمية هي روابط هشَّة بعناقيد نجمية أو بواحدة من المجرَّات الصغيرة — التي يبلغ عددها نحو عشرين — التي تدور حول مجرَّة درب التبانة كالأقمار التي تدور حول أحد الكواكب. وأكثرُ هذه التيارات روعةً في رأينا هو ذلك المسمى «تيار الرامي»، وهو يمتد عبر نطاق مقوَّس لما يزيد عن المليون سنة ضوئية، ويربط بدرب التبانة بما يُطلَق عليه «مجرَّة الرامي البيضاوية القزمة». وهناك تيار آخَر، يُرَى في اتجاه كوكبة العذراء — ومن ثَمَّ يُطلَق عليه تيار العذراء النجمي — يتحرك بزاوية قائمة تقريبًا على سطح مجرَّة درب التبانة، وهو مرتبط بمجرَّة قزمة أخرى.

هذه النوعية من الأدلة تفسِّر أصل التيارات النجمية. فالمجرَّات الصغيرة التي تقترب بشدة من درب التبانة تتفتت وتتبعثر بفعل قوى الجاذبية — قوى المد والجذر — التي تواجهها؛ ومن ثَمَّ تخلِّف تيارًا من النجوم بينما تمضي في مداراتها حول درب التبانة. إن مجرَّة الرامي القزمة في المراحل الأخيرة من هذه العملية، ويمكن تمييزُها اليومَ بالكاد بوصفها مجموعةً منفصلةً من النجوم. وفي نهاية المطاف، لن يتخلَّف شيء سوى تيار النجوم، الذي سيندمج مع مجرَّة درب التبانة؛ ومن ثَمَّ يفقد هويته.

وهذه إشارة واضحة إلى أن درب التبانة قد وصلت إلى حجمها الحالي عن طريق نوعٍ من الالتهام المجرِّي؛ إذ ابتلعت جاراتها من المجرَّات الأصغر حجمًا. وباستخدام الطرق الإحصائية القوية، يستطيع الفلكيون العودة بالزمن إلى الوراء انطلاقًا من المشاهدات الخاصة بالكيفية التي تتحرك بها النجوم اليوم من أجل إعادة بناء أطياف المجرَّات التابعة السابقة، شأنهم في هذا شأن علماء الحفريات القديمة الذين يُعِيدون بناء شكل الديناصورات انطلاقًا من بضع بقايا حفرية. ومثل نِثار الحلوى المرشوش على كعكةٍ، يخبرنا شكل مدارات هذه التيارات النجمية بأن الهالة الممتدة من المادة المظلمة التي تقبع مجرَّةُ درب التبانة داخلها إنما هي كروية الشكل، وليست بيضاوية.

لكن هذه التفاعلات المجرِّيَّة ليست مقصورة على المواقف التي تبتلع فيها مجرَّة كبيرة جاراتها الأصغر حجمًا؛ فكما اكتشف فيستو سليفر، فإن الضوء الصادر عن مجرَّة أندروميدا يُظهِر إزاحةً زرقاء تتوافق مع سرعةِ اقترابٍ تزيد عن ١٠٠ كيلومتر في الثانية (ما يقارب ٢٥٠ ألف ميل في الساعة). وسبب عدم إظهار هذه المجرَّة إزاحةً حمراء — كما أدرك هابل — هو أن الإزاحة الحمراء الكونية لا تسبِّبها الحركةُ عبر الفضاء. فعلى

طول المسافة إلى مجرَّة أندروميدا، من شأن الإزاحة الحمراء أن تكون ضئيلة، بما يكافئ من حيث السرعة نصف مقدار الإزاحة الزرقاء المرصودة لمجرَّة أندروميدا. لكن المجرَّات تتحرك بالفعل عبر الفضاء، وهذه الحركة تسبِّب تأثيرات دوبلر التي تكون مطبوعةً على إزاحاتها الحمراء الكونية.

وباستثناء الإزاحة الخاصة بأقرب جاراتنا، فإن الإزاحة الحمراء الكونية تكون أكبر بكثير من أيِّ تأثير دوبلر، وتكون طاغية. لكن في حالة مجرَّة أندروميدا، يكون تأثير دوبلر أكبرَ بكثير من الإزاحة الحمراء الكونية؛ فمجرَّة أندروميدا آخِذة بالفعل في الاقتراب بسرعة منَّا، وستصطدم بمجرَّة درب التبانة في غضون أربعة مليارات عام من الآن؛ ومن قبيل المصادفة أن هذا سيحدث حين تكون الشمس قد شارفت على نهاية حياتها، وسيؤدي هذا الاصطدام بين مجرَّتين لهما نفس الحجم تقريبًا إلى اندماجهما معًا. إن النجوم في كلا المجرتين تفصل بينها مساحات شاسعة؛ ومن ثَمَّ لن يكون هناك تصادمات بين النجوم في القرصين المجريَّين، لكن عمليات المحاكاة الحاسوبية تُظهِر أن قوى الجاذبية ستتسبَّب في تدمير بنية كلا القرصين مع اندماج النجوم في منظومة واحدة، مشكِّلةً مجرَّة بيضاوية واحدة عملاقة.

كل الاكتشافات الموصوفة في هذا الفصل مهمة لو أنها أخبرتنا فحسب بشأن مجرَّة درب التبانة؛ جزيرتنا الكونية الأم، لكنها تكتسب أهميةً مضاعفةً؛ لأن هناك أدلةً قوية على أن مجرَّة درب التبانة مجرد مجرَّة قرصية عادية، ومثال تقليدي لفئتها من المجرَّات. وبما أن الحال كذلك، فهذا يعني أنه يمكننا في ثقةٍ استخدامُ معرفتنا العميقة ببِنية وتطوُّر مجرتنا، والمبنية على المشاهدات القريبة؛ من أجل تعزيز فهمنا لأصل المجرَّات القرصية وطبيعتها عمومًا. فنحن لا نشغل موضعًا مميزًا في الكون، إلا أن هذه الحقيقة لم تتأكَّد على نحو راسخ إلا مع نهاية القرن العشرين.

الفصل الرابع

العاديَّة المجرِّية

يمكن الزعم أن الثورة العلمية بدأت في عام ١٦٤٣، حين نشر نيكولاس كوبرنيكوس كتابه «عن دورات الأجرام السماوية»، عارضًا الأدلة على أن الأرض ليست مركز الكون، وإنما تدور حول الشمس. ومنذ ذلك الوقت صار من المعروف أن الشمس ما هي إلا نجم عادي، لا يشغل مركزًا مميزًا في مجرَّة درب التبانة، فضلًا عن الكون، وأن البشر ما هم إلا نوع من أنواع الحياة على الأرض، لا يشغلون موضعًا مميزًا، اللهم إلا من واقع نظرتهم القاصرة. ويقول بعض الفلكيين في جدية إن كل هذا يمثِّل دليلًا يدعم «مبدأ العادية الأرضية»، الذي ينصُّ على أن بيئتنا المحيطة تفتقد تمامًا لأي ملامح خاصة مميزة من المنظور الكوني. وهذه الفكرة قد تدعو أي شخص لا يزال يحمل أي أفكار من عصر ما قبل كوبرنيكوس إلى التواضع، لكن لو أنها صحيحة، فهي تعني أننا قادرون على الاستقراء من واقع مشاهداتنا لبيئتنا المحيطة، وأن نخرج بنتائج ذات مغزًى بشأن طبيعة الكون إجمالًا. وإذا كانت مجرَّة درب التبانة مجرَّة عادية، فمن المؤكد أن مليارات المجرَّات الأخرى تشبه مجرَّة درب التبانة، وأنها مجرد ضاحية غير مميزة تشبه أي ضاحية أخرى.

لكن في العقود التي تَلَتْ أول القياسات التي أجراها هابل لمقياس المسافات الكونية، ظلت مجرَّة درب التبانة تبدو مكانًا خاصًّا مميزًا. وقد اقتضت حسابات هابل لمقياس المسافة أن تكون المجرَّات الأخرى قريبة نسبيًّا من مجرتنا؛ ومن ثَمَّ لا يلزم أن تكون كبيرةً للغاية كي تظهر بالحجم الذي تظهر عليه في سمائنا، وبَدَتْ مجرَّةُ درب التبانة المجرَّةَ الأكبر إلى حدٍّ بعيد في الكون، لكننا نعلم الآن أن هابل كان مخطئًا؛ فبسبب الصعوبات التي عانى منها — ومنها الخمود النجمي والخلط الخطير بين النجوم القيفاوية وبين نوعٍ آخَر من النجوم المتغيرة — فإن القيمة التي حدَّدها في البداية لثابت هابل كانت

أكبر بسبع مرات من القيمة المقبولة اليوم. بعبارة أخرى: كانت جميع المسافات المجرِّيَّة التي توصَّل إليها هابل أصغر مما هي عليه في الواقع بسبع مرات. بَيْدَ أننا لم ندرك هذا بين عشية وضحاها؛ فمقياس المسافات الكونية لم يخضع للمراجعة إلا ببطء، على مر عقود عديدة، مع تحسُّن المشاهدات وتصحيح خطأ تلو الآخَر. لا أنوي أن أصطحبك في رحلة عبر جميع الخطوات، وإنما سأقدِّم أبسطَ الأدلة وأكثرها مباشَرةً — مستخدِمًا أحدث المشاهدات وأفضلها — على العادية المجرية لدرب التبانة.

حتى في ثلاثينيات القرن العشرين كان بعض العلماء غير مقتنعين بفكرة أن مجرَّة درب التبانة قد تكون مجرَّة كبيرة على نحو غير معتاد، وقد كان الفلكي آرثر إدنجتون — وأشهر أعماله التي يتذكَّره لأجلها الجميع هو قيادة البعثة الاستكشافية الهادفة لدراسة الكسوف الشمسي عام ١٩١٩، التي تأكدت من صحة تنبؤات نظرية النسبية العامة لأينشتاين — غير مقتنع تمامًا بهذه الفكرة، وعبَّرَ عن شكوكه حيالها على نحو صريح. كان إدنجتون يؤمن بقوة بما نطلق عليه اليوم مبدأ العادية الأرضية، وفي كتابه «الكون المتمدد» المنشور عام ١٩٣٣ كتب إدنجتون قائلًا:

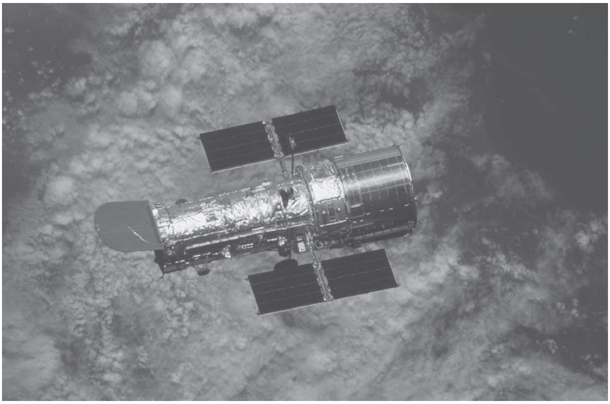
> كثيرًا ما تأكَّدَ لنا في علم الفلك صحة درس التواضع، لدرجة أننا نتبنَّى على نحوٍ تلقائي تقريبًا النظرةَ القائلة بأن مجرتنا ليست مميزة على نحوٍ خاص، وأنها ليست أكثر أهميةً في منظومة الطبيعة من ملايين الجزر المجرِّيَّة الأخرى. لكن يبدو أنه نادرًا ما تعزِّز المشاهدات الفلكية هذه الحقيقة؛ فوفق القياسات الحالية فإن السُّدم الحلزونية أصغر من مجرَّة درب التبانة على نحو واضح، مع أنها تحمل شبهًا عامًّا بنظام مجرَّة درب التبانة، وقد قيل إنه لو كانت السُّدم الحلزونية جزرًا كونية، فإن مجرتنا قارة. وأعتقد أن تواضعي قد تحوَّل إلى نوع من كبرياء الطبقة الوسطى؛ إذ إنني أبغض القول بأننا ننتمي إلى طبقة الكون الأرستقراطية. فالأرض كوكب متوسط، ليس عملاقًا كالمشتري، وليس واحدًا من الكواكب الهامشية شأن الكواكب الأصغر. والشمس نوع متوسط من النجوم، ليست عملاقة كنجم «العيوق» لكنها في الوقت نفسه أعلى من طبقات النجوم الدنيا؛ لذا يبدو أنه من الخطأ القول بأننا ننتمي إلى مجرَّة استثنائية تمامًا. وبصراحة لا أعتقد في صحة هذا الأمر؛ إذ ستكون المصادفة وقتها مبالَغًا فيها للغاية، وأرى أن هذه العلاقة بين درب التبانة وغيرها من المجرَّات سيُلقَى عليها المزيد من الضوء بواسطة المزيد من الأبحاث الرصدية،

وأننا في النهاية سنجد أن هناك مجرَّات عديدة في حجم مساوٍ لحجم مجرتنا، بل يفوقه.

كانت حجة إدنجتون منطقية تمامًا، وفي نهاية المطاف تبيَّنَ أن الصواب كان حليفه. لكن في عام ١٩٣٣ كان هذا مبنيًّا على «كبرياء الطبقة الوسطى» لديه فحسب. فعلى أي حال، بعض المجرَّات أكبر بالفعل من سواها، وإذا كان الكون تُهيمِن عليه حقًّا مجرَّةٌ واحدة هائلة يحيط بها حشدٌ من المجرَّات الأخرى الصغيرة، فيمكنك القول بأن الاحتمال الأكثر ترجيحًا هو أن نجد أنفسَنا على القارة الرئيسية، وليس على واحدة من الجزر. والطريقة الوحيدة لحسم هذه القضية هي أن نمتلك قياسات مسافات أكثر دقةً لعدد كبير بما يكفي من المجرَّات القرصية، كي نحصل على فهم جيد لأحجامها مقارَنةً بحجم مجرَّة درب التبانة. كان هذا يعني المسافات إلى النجوم القيفاوية، ولم يكن ثمة عددٌ كافٍ من هذه القياسات متاحٌ قبل إطلاق تليسكوب هابل الفضائي عام ١٩٩٠، ثم إصلاحه عام ١٩٩٣.

وبعد أكثر من نصف القرن على عمل هابل الرائد، ظلَّتْ أهميةُ تحديدِ مقياس المسافات الكونية بدقة حاضِرةً بقوة، لدرجة أنها مثَّلت المبرر الأساسي وراء تليسكوب هابل الفضائي. فقد كان الهدف المعلَن لمشروع هابل المحوري هو استخدام التليسكوب في الحصول على بيانات من النجوم القيفاوية في ٢٠ مجرَّة على الأقل، واستخدامها في تحديد قيمة ثابت هابل في حدود دقةٍ تزيد أو تنقص بنسبة عشرة بالمائة عن المقدار الصحيح. وبحلول نهاية مرحلة الرصد الخاصة بالمشروع المحوري، كانت المسافات إلى ٢٤ مجرَّة قد حُدِّدت بدقةٍ باستخدام النجوم القيفاوية. وبرغم انتقال فريق التليسكوب هابل إلى المرحلة التالية — استخدام هذه البيانات في معايرة مؤشرات المسافة الأخرى كالمستعرات العظمى — فإن بيانات النجوم القيفاوية الأساسية أُتِيحت لفلكيين آخَرين. وبالتعاون مع سايمون جودوين ومارتن هندري من جامعة ساسكس استخدمتُ عام ١٩٩٦ هذه المسافات الخاصة بالنجوم القيفاوية — ذلك هو «المزيد من الأبحاث الرصدية» الذي دعا إليه إدنجتون — من أجل اختبارِ ما كان إدنجتون يؤمن به من أن مجرَّة درب التبانة ما هي إلا مجرَّة حلزونية عادية (وقد نُشِرت النتائج عام ١٩٩٨).

وباستخدام بيانات تليسكوب هابل الفضائي بالأساس إضافةً إلى بعض البيانات من تليسكوبات أرضية، وجدنا أن هناك ١٧ مجرَّة حلزونية، تشبه عن كثب مجرَّةَ درب التبانة في مظهرها، والمسافات إليها محددة بدقة. إن الطريقة المعيارية لقياس القطر



شكل ٤-١: تليسكوب هابل الفضائي في مداره.

الزاوي لأي مجرَّة هي بالأساس عن طريق رسم خطوط كنتورية للسطوع (خطوط السطوع الكنتورية) حولها، ثم فصل الخطوط عند مستوًى معين من السطوع. وبعد تحديد الأقطار الزاوية بهذه الطريقة والحصول على المسافات الدقيقة من النجوم القيفاوية، تم تحديد الأحجام الخطية للمجرَّات السبع عشرة.

تبيَّنَ أن الجزء الأصعب من المشروع هو قياس قطر مكافئ لقطر مجرَّة درب التبانة، وهي المشكلة الكلاسيكية المتمثلة في عدم قدرتنا على رؤية الصورة الكاملة نظرًا لانغماسنا في التفاصيل. لكن المشاهدات الخاصة بتوزيع النجوم داخل درب التبانة مكَّنَتْنا من حساب ما سيبدو عليه شكلُ المجرَّة من الأعلى، وهذا منحنا قطرَ سطوعٍ كنتوري يقل قليلًا عن ٢٧ كيلو فرسخًا فلكيًّا. وكان السؤال الكبير هو: ما نتيجة مقارنة هذا القطر بأقطار المجرَّات السبع عشرة الأخرى؟ الإجابة المختصرة هي أن متوسط قطر المجرَّات الثماني عشرة في هذه العينة، بما فيها مجرَّة درب التبانة، كان يزيد قليلًا عن ٢٨ كيلو فرسخًا فلكيًّا. فكما تكهَّنَ إدنجتون، ما درب التبانة إلا مجرَّة حلزونية عادية، ذات قطر أقل بكسر بسيط — ليس ذا بال — من المتوسط. والأكيد أنها ليست قارة وسط مجموعة من الجزر، كما أنها ليست أصغر بنحو بالغ عن المتوسط. باختصار: مجرَّة درب التبانة مجرَّة عادية.

وهذا يمكننا، ضمن أشياء أخرى، من أن نستخدم مشاهدات أقطار المجرَّات في تحديد قيمة ثابت هابل، وأن نفعل هذا في حدود الدقة البالغة عشرة بالمائة التي حدَّدها مشروعُ هابل المحوري هدفًا له. وحين نضع هذا في سياق فلكي — كما سأفعل في الفصل التالي — سيتكشَّف لنا عُمْر الكون نفسه؛ أي الوقت الذي انقضى منذ الانفجار العظيم.

الفصل الخامس

الكون المتمدد

بدأ علم الكونيات الحديث مع الاكتشافين العظيمين اللذين توصَّل لهما هابل بشأن المجرَّات: أن هناك جزرًا أخرى في الفضاء خارج مجرَّة درب التبانة، وأن هناك علاقة بين الإزاحة الحمراء للضوء القادم من المجرَّات البعيدة وبين المسافات التي تفصلنا عنها. ويعني هذان الاكتشافان معًا أن بالإمكان استخدام المجرَّات كنماذج اختبار من أجل الكشف عن السلوك الإجمالي للكون. وتحديدًا، يُظهِر هذان الاكتشافان أن الكون آخِذ في التمدد.

مع أن اكتشاف العلاقة بين الإزاحة الحمراء والمسافة كان له وقع المفاجأة عند نهاية عشرينيات القرن العشرين، فإنه قد أُدرِك على الفور أن ثمة نظرية رياضية تصف هذه النوعية من السلوك الكوني موجودة بالفعل: نظرية النسبية العامة لأينشتاين. تصف النسبية العامة العلاقات بين المكان والزمن والمادة والجاذبية، وأحد الملامح الأساسية للنظرية هو أنه لا ينبغي التفكير في المكان والزمن ككيانين منفصلين، وإنما هما وجهان لكيانٍ رباعيِّ الأبعاد يُعرَف باسم الزمكان. ترجع فكرة الزمكان الرباعي الأبعاد إلى عام ١٩٠٨، حين نقَّحَ هيرمان مينكوفسكي نظريةَ النسبية الخاصة لأينشتاين، المنشورة عام ١٩٠٥. وقد قال مينكوفسكي: «من الآن فصاعدًا، حُكِم على المكان بمفرده، والزمن بمفرده، أن يَذوِيَا ليصيرَا محض شبحين، وفقط نوعٌ من الاتحاد بين الاثنين سيحتفظ بواقع مستقل.»

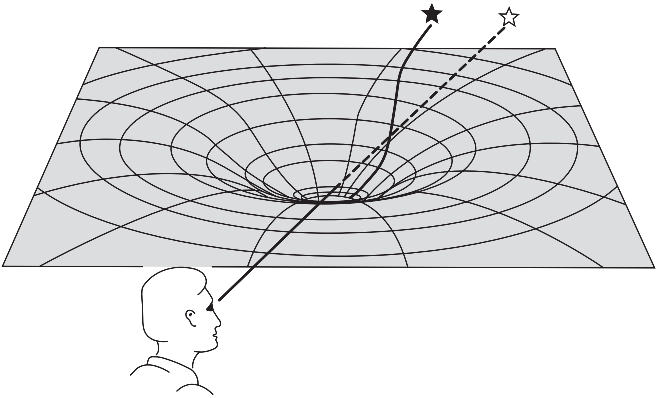
إن مكمن قصور نظرية النسبية الخاصة (السبب وراء وصفها بكلمة «خاصة» هو أنها حالة خاصة من شيء أكثر عمومية) هو أنها لا تتعامل مع الجاذبية أو العجلة (التسارع). فالنسبية الخاصة تصف تحديدًا العلاقات بين كل الأجسام المتحركة والضوء (المستخدَم هنا كمصطلح عام لكلِّ أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسي)، ما دامت تتحرك في

خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة، وتصف الكيفية التي سيبدو بها العالم من منظور أيٍّ من هذه الأجسام. كانت تلك إنجازات أعظم بكثير مما يوحي به هذا الملخص السريع؛ وذلك لأن أينشتاين بالأساس عدَّل فهم إسحاق نيوتن لقوى الحركة، بحيث بات يشتمل على فهم جيمس كلارك ماكسويل للضوء، لكن كان المقصود منها أن تكون خطوةً انتقاليةً على الطريق نحو نظرية تامة تضمُّ الجاذبية والتسارع أيضًا.

وقد حقَّقَ أينشتاين هذا عن طريق النسبية العامة، التي أكملها عام ١٩١٥. أبسطُ سُبُل فهم النسبية العامة يكون من خلال زمكان مينكوفسكي الرباعي الأبعاد. لقد اكتشف أينشتاين أن الزمكان مَرِن؛ ومن ثَمَّ فهو يتشوَّه بفعل وجود المادة. والأجسام التي تتحرك عبر الزمكان تسير في مسارات منحنية حول التشوُّه الذي يسبِّبه وجود المادة، مثلما ستتحرك البلية على سطح ترامبولين في مسارٍ مُنحَنٍ حول الموضع الغائر الذي يسبِّبه وجودُ جسمٍ ثقيلٍ موضوعٍ على الترامبولين، ككرة بولينج. والتأثير الذي نطلق عليه اسم الجاذبية هو نتيجة لانحناء الزمكان. وكما ورد في القول الشهير، فإن «المادة تُملي على الزمكان الكيفيةَ التي سينحني بها، بينما يُملي الزمكانُ على المادة الكيفيةَ التي تتحرك بها.»

المهم في الأمر أيضًا أن أشعة الضوء تتبع المسارات المنحنية المناسبة عبر الزمكان في وجود المادة. والتأثير هنا يكون بسيطًا للغاية، ما لم يكن مقدار المادة المعني ضخمًا، أو تكون المادة منضغطةً في حيِّزٍ صغير بكثافة عالية للغاية، أو كلا الأمرين. لكن هذا التأثير يكون ملحوظًا بالكاد في منطقة الفضاء القريبة من الشمس. لقد تنبَّأت النسبية العامة بأن الضوء القادم من النجوم البعيدة والذي يمر بالقرب من حافة الشمس، من شأنه أن ينحني بمقدار معين، وذلك بسبب الكيفية التي تشوِّه بها كتلةُ الشمسِ الزمكانَ في المنطقة المجاورة لها. ومن على الأرض سيكون التأثيرُ على صورةِ إزاحةٍ للمواضع الظاهرية للنجوم الموجودة في الخلفية، مقارَنةً بالمشاهدات الخاصة بنفس الجزء من السماء حين لا تكون الشمس موجودةً بيننا وبينها. وبما أنه لا يمكن رؤية نجوم الخلفية بسبب وهج الشمس، فإن السبيل الوحيد لرصد هذه التغيُّرات سيكون أثناء كسوف شمسي كلي، حين يُحجَب ضوء الشمس بواسطة القمر. وفي مصادفة سعيدة الحظ للفلكيين، حدث كسوف مشابه عام ١٩١٩، وكانت تلك هي المناسبة التي قاس فيها فريقٌ بقيادة آرثر إدنجتون التأثيرَ المنشود، ووجد أنه يتطابق تمامًا مع تنبؤات نظرية أينشتاين، ومن تلك اللحظة صار أينشتاين عالمًا مشهورًا، مع أن الكثيرين لم يكونوا

يعلمون تحديدًا سبب شهرته. ومن ذلك الوقت اجتازت النسبية العامة كلَّ الاختبارات التي صُمِّمت لها، وكان آخر اختبار هو تجربة دقيقة أُجريتْ في الفضاء لمراقبة تأثيرات جاذبية الأرض على جيروسكوبات عديمة الوزن.



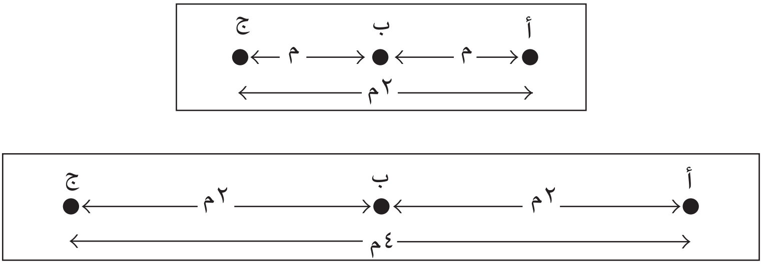
شكل ٥-١: تشوِّه الشمسُ الزمكانَ في المنطقة القريبة المحيطة بها، مثلما يتسبَّب جسم ثقيل موضوع على ترامبولين في إحداث انبعاج غائر. والضوء القادم من النجوم البعيدة يتبع انحناء المكان، وبذا يبدو النجم كأنه يُزاح عن موضعه حين لا تكون الشمس في خط الرؤية.

إن النسبية العامة هي أفضل نظرية نملكها لوصف السلوك الإجمالي للمكان والزمن والمادة. وكما أدرك أينشتاين من البداية، فإن هذا يعني أنها تقدِّم تلقائيًّا توصيفًا للكون، الذي هو المجموع الكلي للمكان والزمن والمادة، لكن المشكلة هي أن النسبية العامة تقدِّم توصيفاتٍ لأكوان عدة؛ فمجموعة المعادلات التي اكتشفها أينشتاين لها العديد من الحلول، كما هو حال الرياضيات دومًا. وهناك مثال مألوف على هذا الأمر: فالمعادلة س^{٢} = ٤ لها حلَّان؛ هما: س = ٢ وس = −٢؛ لأن كلًّا من (٢ × ٢) و(−٢ × −٢) يساوي ٤. معادلات أينشتاين أكثر تعقيدًا، ولها العديد من الحلول، وبعض الحلول تصف أكوانًا آخِذة في التمدد، بينما يصف البعضُ الآخَر أكوانًا آخِذة في الانكماش، وبعضها يصف أكوانًا تتذبذب بين التمدد والانكماش، وهكذا دواليك. لكن ما أدهش أينشتاين هو أنه ما من معادلةٍ منها تصف كونًا ساكنًا في جوهره.

وقد اندهش أينشتاين لأنه في عام ١٩١٧، حين توصَّلَ إلى هذه الحلول بعد إكماله نظرية النسبية العامة، كان الجميع يظن أن الكون ساكن. كان أغلب الفلكيين لا يزالون يظنون أن مجرَّة درب التبانة تمثِّل الكون بأسره، ومع أن النجوم كانت تتحرك داخل مجرَّة درب التبانة، فإنه إجمالًا لم تكن المجرَّة تتمدَّد أو تنكمش. وكان السبيل الوحيد أمام أينشتاين كي يحصل على توصيف رياضي لكون ساكن داخل هيكل النسبية العامة هو استحداث حدٍّ إضافي في معادلاته، يُعرَف الآن باسم الثابت الكوني، وعادة ما يُرمَز له بالحرف اليوناني لامدا (Λ). بعدها باثني عشر عامًا، حين اكتشف هابل العلاقة بين الإزاحة والمسافة، تبيَّنَ أن هذه العلاقة تتوافق مع التوصيف الرياضي الخاص بالكون الآخِذ في التمدُّد في واحدٍ من أبسط حلول معادلات أينشتاين، دون ضرورةٍ للحد لامدا. وقد وصف أينشتاين استحداث الثابت الكوني بأنه «أفدح خطأ» في مسيرته المهنية، وجرى إهمال الثابت الكوني من طرف الجميع تقريبًا خلا قلة من علماء الرياضيات الذين كانوا يحبون العبث بالمعادلات في حد ذاتها؛ سواء أكانت تصف الكون الفعلي أم لا.

إن التبعات الكاملة لاكتشاف أن النسبية العامة تقدِّم توصيفًا جيدًا لكوننا مشروحةٌ بالتفصيل في كتاب بيتر كولز الذي أشرنا إليه سلفًا. لكن النقطة الأساسية التي يجب تفهُّمها هي أن التمدد الذي تصفه المعادلات ليس تمدُّدًا «للمكان» مع مرور الزمن؛ فالإزاحة الحمراء الكونية ليست تأثير دوبلر تتسبَّب فيه حركة المجرَّات بعيدًا داخل المكان، كما لو أنها تفر من موقع انفجار كبير، بل هي تحدث لأن المكان (الفضاء) بين المجرَّات نفسه هو الذي يتمدَّد؛ ومن ثَمَّ فالمكان بين المجرَّات يزداد بينما الضوء يسير في طريقه من إحدى المجرَّات إلى أخرى، وهذا يسبب استطالة موجات الضوء بحيث تصير أطوالها الموجية أطول، وهو ما يعني انزياحها نحو الطرف الأحمر من الطيف.

لكن الطريقة التي تحدث بها الاستطالة تُنتِج إزاحات حمراء تعتمد على تأثيرات نسبوية. وإذا ترجمنا الإزاحات الحمراء إلى سرعات مكافئة، فعندئذٍ سيكون سلوكها بسيطًا للغاية، ما دامت السرعات المعنية صغيرةً مقارَنةً بسرعة الضوء. عادةً ما يُستخدَم الحرف z للإشارة إلى الإزاحات الحمراء، وإذا كانت z تساوي ٠٫١ فهذا يعني أن الجرم يبتعد بسرعةٍ تساوي عُشْر سرعة الضوء (أي بنحو ٣٠ ألف كيلومتر في الثانية، وهي سرعة أكبر من أي سرعة قيست في الدراسات الرائدة التي أجراها هابل وهيوماسون). والإزاحة التي مقدارها ٠٫٢ تعني أن الجرم يبتعد بسرعة ضعف سرعة الجرم الأول،



شكل ٥-٢: تمدُّد الزمكان يشبه استطالةَ قطعةٍ من المطاط. «المجرَّات» (أ) و(ب) و(ج) لا تتحرك عبر المكان (الفضاء) الفاصل بينها. لكن حين يتمدد المكان بين (أ) و(ب) إلى ضعف المسافة، فإنه يتضاعف بالمثل بين أي مجرتين أخريين، بما في ذلك (أ) و(ج). ومن منظور كل مجرَّة في هذا الكون تبتعد كلُّ مجرَّة أخرى عنها بمعدل يتناسب طرديًّا مع المسافة بينهما، ولأن المسافة بين المجرَّة (أ) والمجرَّة (ج) تساوي ضعف المسافة بين المجرتين (أ) و(ب)، فإنه حين تتضاعف كل المسافات (حين يتضاعف معامل القياس) يبدو كأن المجرَّة (ج) «ابتعدت» عن المجرَّة (أ) بسرعة مضاعفة لسرعة ابتعاد المجرَّة (ب) عن المجرَّة (أ).

وهكذا دواليك؛ وذلك وصولًا إلى حدٍّ معين. وبما أنه لا شيء يستطيع التحرك بسرعة تفوق سرعة الضوء، فإن أكبرَ إزاحةٍ حمراء يمكن إنتاجها إذا كانت هذه القاعدة البسيطة صحيحةً هي ١، لكن حين تُؤخَذ التأثيرات النسبوية في الاعتبار، فإن أكبر إزاحة حمراء ممكنة — تلك التي تتوافق مع سرعة تباعُد تساوي سرعة الضوء — تكون لا نهائية. فالتأثيرات النسبوية تصير مهمةً ما إن نتعامل مع «سرعات» أكبر من نحو ثلث سرعة الضوء، وإن أخذنا هذه التأثيرات في الاعتبار، فإن الإزاحة الحمراء التي تساوي ٢ — مثلًا — لا تعني أن الجرم يبتعد عنَّا بسرعة تساوي ضعفَيْ سرعة الضوء، وإنما بسرعة تساوي ٨٠ بالمائة من سرعة الضوء، بينما الإزاحة الحمراء التي تساوي ٤ تعني أن سرعة التباعُد تساوي ٩٢ بالمائة من سرعة الضوء. وفي وقتنا الحالي قيست إزاحات فردية يزيد مقدارها عن ١٠، لكن هذه استثناءات نادرة.

في الواقع، ثمة قليلٌ جدًّا من المجرَّات المنعزلة في الكون؛ فأغلب المجرَّات توجد ضمن عناقيد قد تحتوي على ما يتراوح بين بضع مجرَّات وآلاف المجرَّات، تبقيها معًا قوةُ الجاذبية. تتحرك المجرَّات المنفردة داخل العنقود حول مركز كتلتها المشترك، بينما

يُحمَل العنقود بأكمله بعيدًا بفعل تمدد المكان. وكشأن سرب من النحل، تتحرك المجرَّات بعضها حول بعض فيما يمضي العنقود كله في طريقه وحدةً واحدة؛ لذا حين ننظر إلى الضوء القادم من المجرَّات في أحد العناقيد، نجد أن هناك نوعًا من الإزاحة المتوسطة؛ وهي الإزاحة الكونية التي يسبِّبها تمدُّد الكون، لكننا نرى أيضًا أن بعض المجرَّات لها إزاحات حمراء أكبر قليلًا، وبعضها له إزاحات أصغر قليلًا. المجرَّات ذات الإزاحات الحمراء الأصغر هي تلك المجرَّات التي تتحرك مقترِبةً منَّا؛ ومن ثَمَّ فإن حركتها عبر المكان تصنع إزاحة دوبلر زرقاء، وهو ما يقلِّل من إزاحتها الحمراء الإجمالية. أما المجرَّات ذات الإزاحات الحمراء الأكبر فهي تلك التي تتحرك مبتعِدة عنَّا؛ ومن ثَمَّ فإن حركتها عبر المكان تصنع إزاحة دوبلر حمراء، وهو ما يزيد من إزاحتها الحمراء الإجمالية. وكل هذا يُؤخَذ في الحسبان حين يستخدِم الفلكيون التعبيرَ المختصر: «تُظهِر المجرَّات إزاحةً حمراء تتناسب طرديًّا مع مسافاتها.»

النقطة المحورية الثانية بشأن التمدد الكوني هي أنه عديم المركز؛ فلا يوجد شيء خاص بشأن حقيقة أننا نرصد المجرَّات وهي تتباعد بإزاحات حمراء تتناسب طرديًّا مع مسافاتها إلى درب التبانة. وفي مثال آخَر على العادية الأرضية، فإنه مهما كانت المجرَّة التي يتصادف أنك توجد بها، فسترى الأمر عينه؛ أي إزاحة حمراء تتناسب طرديًّا مع المسافة. ويمكن لتشبيه بسيط توضيح هذا الأمر؛ تخيَّلْ شكلَ سطح كرة تامة، مرسومة عليه نقاط عشوائية من الألوان تمثِّل المجرَّات. إذا تمدَّدت هذه الكرة، فستزداد المسافات بين هذه النقاط، بالطريقة عينها التي يزداد بها الانفصال بين المجرَّات في الكون الحقيقي مع تمدُّده. افترِضْ أن معدل التمدد يضاعف المسافة بين كل نقطتين، بحيث إن النقطتين اللتين كان يفصل بينهما سنتيمتران، ينتهي بهما الحال بأن يفصل بينهما أربعة سنتيمترات، وإن النقطتين اللتين كان يفصل بينهما أربعة سنتيمترات، ينتهي بهما الحال بأن يفصل بينهما ثمانية سنتيمترات، وهكذا. وإذا كانت هناك ثلاث نقاط على خط مستقيم يفصل بين كل اثنتين منها قبل التمدد سنتيمتران، فستكون المسافة بعد التمدد بين النقطة المركزية وكلٍّ من النقطتين المجاورتين لها أربعة سنتيمترات، لكن المسافة بين النقطتين الطرفيتين ستبلغ ثمانية سنتيمترات. فمن منظور أيٍّ من النقطتين الطرفيتين ستكون النقطة المركزية قد ابتعدت مسافة سنتيمترين، لكن النقطة الطرفية الأخرى ستكون ابتعدت بمقدار أربعة سنتيمترات. لقد بدأت على مسافة مضاعفة مقارَنةً بالنقطة المركزية، ومقدار «إزاحتها الحمراء» يبلغ ضعف مقدار إزاحة النقطة القريبة

منها. ومن منظور كل نقطة على سطح الكرة، تكون الصورة العامة هي نفسها؛ فالإزاحة الحمراء تتناسب طرديًّا مع المسافة.

لكن ماذا لو تخيلنا أن حجم الكرة قد تقلَّص؟ في هذه الحالة ستتقارب النقاط بعضها من بعض، وتتناسب «الإزاحة الزرقاء» طرديًّا مع المسافة، وهذا يكافئ النظر إلى الماضي نحو تاريخ الكون الآخِذ في التمدد. فمن الواضح أنه لو كانت المجرَّات آخِذة في الابتعاد بعضها عن بعض اليوم، فمن المؤكد أن بعضها كان أقرب إلى بعض في الماضي. أما ما قد يكون أقل وضوحًا — لكن النسبية العامة تتطلَّبه — فهو أنك لو عكست اتجاه هذا التمدد بدايةً مما عليه الأحوال اليوم، وفعلت هذا لوقت طويل كافٍ، فستصل إلى وقت كان فيه كلُّ المادة وكلُّ المكان مدمجَيْن معًا في نقطة رياضية — نقطة تفرُّد — صفرية الحجم وذات كثافة لا نهائية، شبيهة بنقاط التفرد المتنبَّأ بوجودها في قلوب الثقوب السوداء. وكما الحال بالنسبة لنقاط التفرُّد الخاصة بالثقوب السوداء، فلأن الفيزيائيين لا يصدِّقون النظريات التي تتنبَّأ بظروف فيزيائية متطرفة بدرجة لا نهائية، يُعتقَد أن النسبية العامة تنهار عند وصولها إلى ذلك الحد.

لكن ثمة أسبابًا عدة تدفعنا للاعتقاد بأن الكون بدأ في حالة صغيرة الحجم للغاية (أصغر من الذرَّة)، ودرجة حرارة وكثافة عاليتَيْن للغاية (كثافة تحتوي على كلِّ المادة الموجودة في الكون اليوم)، حتى إن لم يكن أيٌّ من هذه الخصائص لا نهائيًّا. وهذه الفكرة التي تقضي بوجود بداية فائقة الكثافة والحرارة هي أساس نموذج الانفجار العظيم للكون. وقد بدأت فكرة الانفجار العظيم تؤخذ بجدية في النصف الثاني من القرن العشرين، حين أخذت المشاهدات المتزايدة تؤكِّد على حقيقة تمدُّد الكون. والسؤال الكبير الذي جاهد الفيزيائيون في محاولة لحله هو: متى حدث الانفجار العظيم؟ وكم يبلغ عمر الكون؟ وقد جاءت الإجابة من دراسات المجرَّات، التي قدَّمت قياسات لثابت هابل.

إن ثابت هابل هو مقياس للسرعة التي يتمدد بها الكون اليوم، وإذا كان الكون آخِذًا في التمدد بالمعدل ذاته، فهذا يخبرنا بمقدار الوقت المنقضي منذ الانفجار العظيم. وإذا قمنا بقسمة ١ على قيمة ثابت هابل ($1/H$) فسنعرف مقدار الوقت المنقضي منذ أن كانت المجرَّات مجتمعة في نقطة واحدة؛ أي الوقت المنقضي منذ الانفجار العظيم. وبالطريقة عينها، إذا غادرَتْ سيارة ما مدينةَ لندن متجهة غربًا على امتداد الطريق «إم٤» بسرعةٍ ثابتةٍ قدرها ٦٠ ميلًا في الساعة، فعلى بُعْد ١٢٠ ميلًا من لندن سنعرف أن

الرحلة بدأت منذ ساعتين تحديدًا. لكن الأمور أعقد قليلًا هنا؛ لأن أبسط نموذج للكون مستقًى من معادلات أينشتاين يقول إن الكون لا بد أنه قد بدأ في التمدد بسرعة أكبر، ثم تباطأ التمدد مع مرور الزمن، وذلك بفعل الجاذبية التي تعيق التمدد؛ ومن ثَمَّ فإن التقييم الأفضل لعمر الكون يكون بأخذ ثلثَيْ قيمة $(1/H)$، أما قيمة $1/H$ نفسها فيشار إليها باسم: «عمر الكون وفقًا لثابت هابل». لكن النقطة المهمة هنا هي أننا لو تمكَّنَّا من قياس ثابت هابل فسنتمكَّن من قياس عمر الكون.

ولأن عمر الكون يتناسب عكسيًّا مع قيمة ثابت هابل، فكلما صغرت قيمة ثابت هابل كان الكون أكبر عمرًا. وباستخدام القيمة التي حدَّدها هابل نفسه للثابت — والبالغة ٥٢٥ كيلومترًا في الثانية لكل ميجا فرسخ فلكي — يكون عمر الكون نحو مليارَيْ عام. لكن حتى في ثلاثينيات القرن العشرين كان من الجلي أن ثمة خطأً ما في هذا التقدير؛ لأنه يقلُّ عن عمر كوكب الأرض، وهذا هو السبب وراء أن فكرة الانفجار العظيم لم تبدأ في أن تُؤخَذ مأخذ الجدية إلا بعد أربعينيات القرن العشرين، حين حدثت مراجَعةٌ جذرية لمقياس المسافات، وذلك بعد إزالة الخلط الحادث بين نوعين من النجوم المتغيرة. وبضربة واحدة، خُفِّض ثابت هابل إلى النصف، وتضاعفت التقديرات الخاصة بعمر الكون، وهو ما جعل عمر الكون يبدو قريبًا من عمر كوكب الأرض.

لكن في الوقت عينه تقريبًا، بدأ الفلكيون في تطوير فهمٍ جيد لكيفية عمل النجوم، وعمل تقديرات موثوق بها لأعمارها، فتبيَّنَ أن بعض النجوم يبلغ من العمر أكثر من عشرة مليارات عام، وهو ما سبَّبَ مجددًا الحرج لفكرة الانفجار العظيم بالشكل الذي كانت عليه في خمسينيات القرن العشرين. وقد كان هذا أحد الأسباب التي جعلت نموذجًا كونيًّا منافِسًا — نموذج الحالة الثابتة — جذَّابًا في أعين بعض الفلكيين في ذلك الوقت. كانت الفكرة وراء نموذج الحالة الثابتة هي أنه بينما تتباعد المجرَّات في كون متمدد، فإن القوى المسئولة عن استطالة المكان تتسبَّب أيضًا في ظهور مادة جديدة في الفجوات بين المجرَّات؛ ذرات من الهيدروجين من شأنها أن تكوِّن سُحُبًا من الغاز الذي منه تتكوَّن مجرَّات جديدة كي تملأ الفجوات. وفق هذه الصورة، لا وجودَ لبدايةٍ للكون، ولن تكون هناك نهاية، ويبدو الكون على الدوام بنفس المظهر تقريبًا، لكن في ستينيات القرن العشرين دُقَّ المسمار الأخير في نعش نموذج الحالة الثابتة، حين اكتشف اثنان من المتخصصين في علم الفلك الراديوي هسيسًا من ضوضاء الراديو آتيًا من كل اتجاه في الفضاء. وقد فُسِّر إشعاع الخلفية الميكروني الكوني هذا — الذي تنبَّأت به نظرية

الانفجار العظيم (مع أن هذا التنبؤ قد ذهب طي النسيان!) — على أنه البقايا الخافتة للإشعاع القوي الصادر عن الانفجار العظيم نفسه، وهو التفسير الذي تعزَّزَ بمشاهدات لاحقة؛ منها تلك الآتية من أقمار صناعية متخصِّصة أُرسِلت إلى الفضاء لدراسة هذا الإشعاع. وقد زالت الحاجة لنموذج الحالة الثابتة البديل؛ لأن التقديرات الخاصة بعمر الكون زادت تدريجيًّا مع مرور الأعوام.

ومنذ عام ١٩٥٠ فصاعدًا، قلَّلت المراجعاتُ التدريجية لمقياس المسافة — والمبنية على المشاهدات الآخِذة في التحسُّن — قيمةَ ثابت هابل إلى أن صار، مع بداية تسعينيات القرن العشرين، معروفًا أنه يقع في نطاقٍ يتراوح بين ٥٠ و١٠٠، بالوحدات المعتادة، أو كما عَبَّرَ أحد الفلكيين عن الأمر: ٧٥ ± ٢٥. ومن هنا جاء مشروع تليسكوب هابل المحوري.

وكحال مجرَّة أندروميدا فإن المجرَّات داخل العناقيد عادةً ما تتحرك على نحوٍ عشوائي عبر الفضاء بسرعة بضع مئات الكيلومترات في الساعة، وهذا يعني أنه من أجل الحصول على تقديرات موثوق بها للإزاحة الحمراء الكونية لعنقود مجرِّيٍّ، من الأفضل النظر إلى العناقيد المجرِّيَّة البعيدة؛ حيث تكون الإزاحة الحمراء أكبر وتمثِّل السرعات الفردية العشوائية وما يرتبط بها من إزاحات دوبلر الزرقاء نسبةً أصغر من الإزاحة الحمراء الكلية. لكن بطبيعة الحال من الأصعب قياس المسافات في حالة العناقيد المجرِّيَّة البعيدة؛ لذا ثمة نوع من المقايضة حين يتعلَّق الأمر باستخدام العناقيد بهذه الطريقة من أجل تحديد قيمة ثابت هابل. استخدم مشروع تليسكوب هابل المحوري الطريقةَ التقليدية التي ابتكرها هابل نفسه، والخاصة بالحصول على المسافات الدقيقة إلى المجرَّات القريبة عن طريق النجوم القيفاوية؛ وذلك باستخدام المسافات الخاصة بالنجوم القيفاوية في معايرة سطوع مؤشرات المسافة الأخرى، كالمستعرات العظمى، ثم المضي أبعد في الكون في سلسلة من الخطوات. كان الفارق في هذه الحالة، بعد ستين عامًا من وقت هابل، أننا نملك تليسكوبًا أفضل، وأنه جرى التخلص من الخلط بين نوعين مختلفين من النجوم المتغيرة، وأن الخمود النجمي صار مفهومًا، وأن مؤشرات المسافة الثانوية كالمستعرات العظمى صارت مفهومة على نحوٍ أفضل هي الأخرى عمَّا كان عليه الحال في وقت هابل. وبلغ التقدير النهائي الذي توصَّلَ إليه فريق عمل المشروع لثابت هابل، في مايو ٢٠٠١: ٧٢ ± ٨، وهو ما يعني أن عمر الكون يبلغ نحو ١٤ مليار عام. ومن حسن الطالع أنه في العقد السابق على ذلك، في تسعينيات القرن العشرين، كانت

أعمار النجوم التي نراها قد تحدَّدت بواسطة طرق مستقلة تمامًا، ووُجِد أنها تبلغ نحو ١٣ مليار عام؛ وبذا يكون الكون أكبر بالفعل من النجوم والمجرَّات التي يحتوي عليها.

وهذه النتيجة أعمق كثيرًا مما تبدو عليه من الوهلة الأولى؛ فعمر الكون يتحدد من خلال دراسة بعضٍ من أكبر الأشياء في الكون — العناقيد المجرِّيَّة — وتحليل سلوكها باستخدام النسبية العامة. وفهمُنا للكيفية التي تعمل بها النجوم، والتي منها حسَبنا أعمارها، يأتي من دراسة بعضٍ من أصغر الأشياء في الكون — نوى الذرات — واستخدام النظرية العظيمة الأخرى للقرن العشرين — ميكانيكا الكم — في حساب الكيفية التي تندمج بها النوى بعضها مع بعض كي تُطلِق الطاقة التي تُبقي النجوم على سطوعها. وحقيقة أن العمرين يتماثل كلٌّ منهما مع الآخر، وأن أعمار أقدم النجوم تقل قليلًا عن عمر الكون، هي واحدة من أكثر الأسباب إقناعًا للإيمان بأن فيزياء القرن العشرين بأسرها ناجحة، وأنها تقدِّم توصيفًا جيدًا للعالم من حولنا، بدايةً من أصغر نطاقات الحجم وانتهاءً بأكبرها.

في الوقت الحالي تأكَّدَ، من خلال طرق أخرى مستقلة، أنَّ قيمةَ ثابتِ هابل تقترب من ٧٠ كيلومترًا في الثانية لكل ميجا فرسخ فلكي. وبعض هذه الطرق يتضمَّن معداتٍ تكنولوجيةً متقدمة على غرار الأقمار الصناعية، وفهمًا راقيًا للفيزياء، لكنَّ نهجًا واحدًا بسيطًا يوضِّح بجلاء العلاقة بين المجرَّات والكون، وعند الجمع بينه وبين القياسات الأخرى الأكثر تعقيدًا، فإن العاديَّة المجرِّيَّة تتعزَّز لدينا.

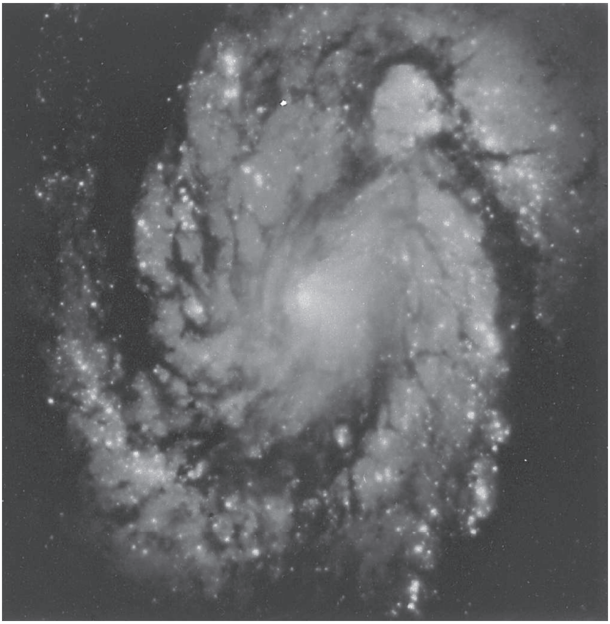
إن الدليلَ على أن مجرَّة درب التبانة ما هي إلا مجرَّة حلزونية عادية؛ مبنيٌّ على عيِّنةٍ صغيرة إلى حدٍّ ما من المجرَّات القريبة نسبيًّا إلينا، وذلك بالمقاييس الكونية. لكن إذا تقبَّلنا هذا الدليل بمعناه الظاهري، فسيقدِّم لنا طريقة لتقدير المسافات إلى المجرَّات الأخرى، وذلك عن طريق مقارنة أحجامها بحجم مجرَّة درب التبانة، أو مقارنته بمتوسط العيِّنة المحلِّية من المجرَّات، التي تناهِز القيمة عينها تقريبًا. لا مغزى تقريبًا من وراء عقد مثل هذه المقارنات بالمجرَّات المنفردة؛ لأننا نعلم أن هناك نطاقًا عريضًا من الأحجام؛ فأكبر المجرَّات الحلزونية في الجوار، المجرَّة M101، يبلغ قطرها نحو ٦٢ كيلو فرسخًا فلكيًّا؛ أي أكبر من ضعفَيْ قطر مجرَّة درب التبانة؛ ومن ثَمَّ فإن تقدير المسافة إليها عن طريق الافتراض أن حجمها يساوي حجم مجرَّة درب التبانة لن يكون فكرةً سديدةً. إن ما نحتاج إليه هو قياس إحصائي من نوعٍ ما، بحيث يمكننا أن نأخذ الحجمَ المتوسط للمجرَّات البعيدة للغاية عبر الكون ونقارن هذا المتوسط بمتوسط حجم المجرَّات القريبة.



شكل ٥-٣: المجرَّة غير المنتظمة NGC 1427.

منذ وقت هابل بنى الراصدون فهارسَ تحدِّد مواضع آلاف المجرَّات وإزاحاتها الحمراء وأحجامها الزاويَّة؛ فهارسَ عديدةً مختلفة يحتوي كلٌّ منها على آلاف المجرَّات. بعض هذه الفهارس يتضمَّن الأحجام الزاوية، التي يُعبَّر عنها عادة من خلال أقطار خطوط السطوع الكنتورية عينها المستخدَمة في تحديد مدى عاديَّة مجرَّة درب التبانة. وكل قُطْر زاويٍّ يمكن تحويله إلى قطر خطِّي حقيقي عن طريق ضربه في رقم يعتمد فقط على الإزاحة الحمراء، التي نعرفها، وفي ثابت هابل، الذي نفترض أننا نعرفه بالفعل. وإذا أخذنا آلاف المجرَّات ذات الإزاحات المختلفة، والمنتشرة عبر السماء، يكون من الممكن أن نختار قيمةً ما لثابت هابل، وأن نحسب كل الأقطار الخطِّية، وبعد ذلك نأخذ متوسطًا للعيِّنة كلها كي نقدِّر الحجم المتوسط للمجرَّة. ومن اليسير عمل هذا الأمر مرارًا وتكرارًا باستخدام جهاز كمبيوتر يواصل تغيير قيمة ثابت هابل، إلى أن تصير القيمة المتوسطة

التي تخرج بها الحسابات مساويةً للقطر المتوسط الخاص بالمجرَّات الحلزونية القريبة على غرار مجرَّة درب التبانة؛ وهذا يمنحنا قيمةً فريدةً لثابت هابل.



شكل ٥-٤: المنطقة المركزية للمجرَّة M100، كما صوَّرَتها كاميرا الحقل الواسع الكوكبية ٢ الموجودة على تليسكوب هابل الفضائي.

ثمة صعوبات عملية علينا التغلُّب عليها؛ فمثلًا علينا التأكُّد من أن كل الأقطار قد قِيست بالطريقة عينها، وأن العينة مقصورة على المجرَّات التي لها نفس البنية الإجمالية التي للمجرَّات الموجودة في عيِّنَتنا المحلية، وأن المشاهدات تلتقط بالفعل كلَّ المجرَّات ذات الصلة. وأحد أهم العوامل التي يجب وضعها في الحسبان أنه من الأيسر رؤية المجرَّات الأكبر؛ لذا في حالة الإزاحات الحمراء الأكبر ستحتوي عيِّنة المجرَّات على عدد أقل مما ينبغي من المجرَّات الصغيرة؛ لأنه جرى إغفالها، وهذا التأثير يُعرف باسم «تأثير مالمكويست». لكن لحسن الحظ، عن طريق مقارنة أعداد المجرَّات ذات الأحجام المختلفة

الموجودة على إزاحات حمراء مختلفة يصير من الممكن حساب المقدار الإحصائي لهذا التأثير — الطريقة التي يتم بها إغفال المجرَّات الصغيرة في العينة مع زيادة مقدار الإزاحة الحمراء — وتصويبه. من أوجه التعقيد أيضًا أن علينا حذف المجرَّات القريبة من الحسابات؛ لأن إزاحات دوبلر العشوائية الخاصة بها تناهِز الإزاحات الحمراء الكونية في المقدار وتسبِّب تشوُّشَ الصورة. لكن هذ الطريقة تصلح مع المجرَّات حتى مسافة ١٠٠ ميجا فرسخ فلكي، وحتى في ظل كل هذه المحاذير يقدِّم أحد الفهارس القياسية، المعروف باسم «آر سي ٣»، مجموعةً فرعية تتكوَّن من أكثر من ألف مجرَّة مناسبة تفي بهذه المعايير، وهذا عدد وفير يمثِّل عيِّنة موثوقًا بها إحصائيًّا. وعند انتهاء كل العمل، يتبيَّن أن قيمة ثابت هابل المبنية على مقارَنة أقطار المجرَّات تقع في أعلى الستينيات، هذا إذا كانت درب التبانة مجرد مجرَّة عادية حقًّا. وهذه القيمة تتفق مع القياسات الأخرى.

بالطبع ليست هذه أفضل أو أدق طريقة لقياس ثابت هابل، لكنها طريقة قيِّمَة لسببين: السبب الأول هو أنها طريقة فيزيائية بارعة يمكن تفهُّمها من منظور خبراتنا الحياتية اليومية، التي فيها نعرف أن البقرة التي تقف على الطرف القَصِيِّ لحقلٍ كبير تبدو أصغر حجمًا لأنها بعيدة، وهي لا تتطلب أيَّ فهم عميق للفيزياء أو الرياضيات. والسبب الثاني هو أنه يمكن استخدام المنطق على نحوٍ معكوس أيضًا. فأوَّل إثباتٍ حقيقي لكون مجرَّة درب التبانة هي مجرَّة حلزونية عادية جاء من مقارَنةِ حجمها بأحجام ١٧ مجرَّة أخرى قريبة نسبيًّا فقط، لكن لو كان ثابت هابل قريبًا من ٧٠، وهو ما تشير إليه التحليلات والمشاهدات الأكثر تقدُّمًا، فعندئذٍ يمكن استخدام تلك القيمة في حساب الحجم المتوسط للألف والنيِّف مجرَّة في عيِّنتنا — وبعضها يبعد مائة ميجا فرسخ فلكي عنَّا — ونجد أنها قريبة للغاية بالفعل من حجم مجرَّة درب التبانة، ومن الحجم المتوسط لعيِّنَتنا القريبة من المجرَّات. وعلى أقل تقدير، مجرتنا مماثلة لنوعية المجرَّات القرصية الموجودة في منطقتنا «المحلية» من الفضاء التي يبلغ عرضها ٢٠٠ ميجا فرسخ فلكي، ويبلغ حجمها أكثر من ٤ ملايين ميجا فرسخ فلكي مكعب.

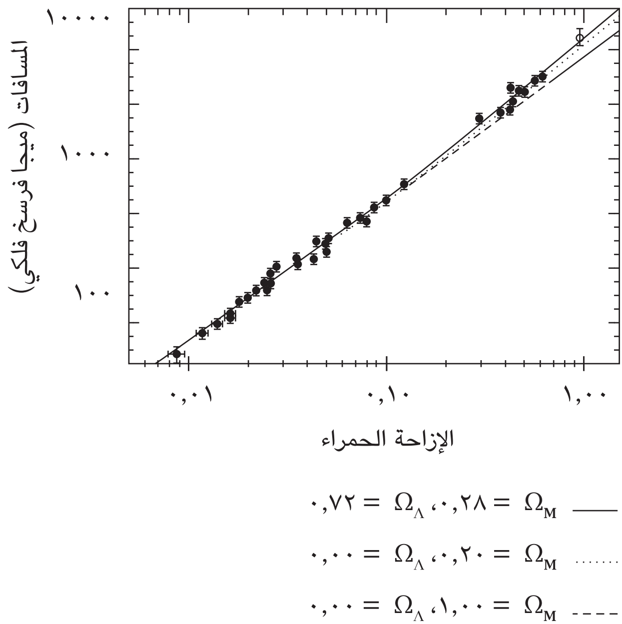
لكن لا تزال هذه في حقيقة الأمر فقاعة محلية مقارَنةً بحجم الكون القابل للرصد؛ فهناك أجرام بإزاحات حمراء معروفة تتوافق مع مسافات تزيد عن عشرة ملايين سنة ضوئية؛ أي أبعد ثلاثين مرة من أبعد المجرَّات المستخدَمة في هذه الطريقة لتقدير قيمة ثابت هابل. ودراسات هذه الأجرام تبيِّن أن الأمر ينطوي على ما هو أكثر من هذا؛ إذ يبدو أن تمدُّد الكون لم يتباطأ منذ الانفجار العظيم بالكيفية التي تتنبَّأ بها أبسط حلول معادلات أينشتاين، بل ربما بدأ في التسارع.

في تسعينيات القرن العشرين بدأ الفلكيون في استخدام مشاهدات المستعرات العظمى في معايرة العلاقة بين الإزاحة الحمراء والمسافة من أجل الإزاحات الحمراء التي تساوي ١ تقريبًا (أكبر إزاحاتٍ حمراء معروفة لمثل هذه المستعرات تقل عن ٢). وتعتمد هذه الطريقة على اكتشاف أن نوعًا معينًا من المستعرات العظمى — عائلة تُعرَف باسم «المستعرات العظمى من النوع ١أ» — يبدو أن كلَّ أفراده يصلون لنفس القيمة القصوى من السطوع المطلق، وقد جرى اكتشاف هذا من خلال مشاهدات المستعرات العظمى من النوع «١أ» في المجرَّات القريبة التي نعرف جيدًا المسافات التي تفصلنا عنها. وقد مثَّلَ هذا الاكتشاف أهميةً خاصةً؛ لأن المستعرات العظمى ساطعةٌ للغاية، لدرجة أنها يمكن أن تُرَى من على مسافات بعيدة جدًّا.

ومع أن المستعرات العظمى من النوع «١أ» لها السطوع المطلق نفسه، فإنها كلما كانت على مسافة أبعد في الكون، بَدَتْ أكثر خفوتًا، وهذا يعني أنها لو كانت تصل بالفعل إلى نفس القيمة القصوى من السطوع المطلق، فإنه من خلال قياس القيمة القصوى من السطوع الظاهري للمستعرات العظمى من النوع «١أ» في المجرَّات البعيدة للغاية، سيكون بإمكاننا حساب مقدار بُعْد هذه المجرَّات عنَّا، وإذا أمكننا قياس الإزاحات الحمراء لنفس هذه المجرَّات كذلك، فسيكون بمقدورنا معايرة ثابت هابل. وحين جرت هذه المشاهدات، باستخدام أقصى حدود قدراتنا التكنولوجية، وجد الراصدون أن المستعراتِ العظمى في المجرَّات البعيدة للغاية أخفَتُ قليلًا مما ينبغي أن تكون عليه لو كانت المجرَّات التي توجد فيها تقع على المسافات التي تشير إليها القيمة المتفق عليها لثابت هابل.

لا يمكن استبعاد إمكانية أن تكون المستعرات العظمى في هذه المجرَّات البعيدة لا تسطع بنفس مقدار سطوع تلك الموجودة في المجرَّات الأقرب إلينا؛ بَيْدَ أن أفضل استنتاج يتوافق مع كل الأدلة المتاحة هو أن هذه المستعرات العظمى أبعد بالفعل عمَّا يُفترض أن تكون عليه لو كان الكون يتمدَّد بما يتوافق مع أبسط النماذج الكونية منذ الانفجار العظيم. فهناك تعديل بسيط مطلوب لمعادلات أينشتاين كي تتوافق أجزاء الصورة معًا؛ إذ لا بد من إعادة إدخال ثابت كوني صغير إلى المعادلات مجدَّدًا. ربما لم يكن إدخال الثابت الكوني في البداية خطأً فادحًا من جانب أينشتاين.

حين استحدث أينشتاين ثابته الكوني فإنه فعل ذلك كي يحافظ على نموذج الكون ساكنًا، لكن يمكن لاختيارات مختلفة لقيمة هذا الثابت أن تجعل نموذج الكون يتمدَّد



شكل ٥-٥: باستخدام مشاهدات المستعرات العظمى على إزاحات حمراء عالية للغاية، يمكن بَسْطُ مخطط العلاقة بين الإزاحة الحمراء والمسافة لمسافةٍ بعيدة داخل الكون. وأفضل تمثيل يتفق مع البيانات (الخط المتصل) يسمح بوجود الثابت الكوني لامدا Λ، الذي ناقشناه فيما سبق.

على نحوٍ أسرع أو أبطأ، أو تجعله ينهار. واحتواء المعادلات على نوعية الثابت الكوني المطلوب لتفسير مشاهدات المستعرات العظمى يعني ضمنًا أن الكون بأسره مملوءٌ بنوعٍ من الطاقة ليس لها تأثير موضعي ملحوظ على المادة العادية المألوفة، بل هي تعمل عمل السائل المرن المضغوط، بحيث تدفع الكون إلى الخارج في مقابل قوة الجاذبية التي تسحبه إلى الداخل. ولأن الثابت الكوني يُطلَق عليه على نحوٍ تقليديٍّ المسمَّى لامدا، فإن هذا الحقل يُسمَّى «حقل لامدا»، وإذا اخترنا قيمة كثافة مناسبة لهذا الحقل، يكون من اليسير تفسيرُ الكيفية التي تباطَأ بها الكون في تمدُّده خلال المليارات القليلة الأولى من

الأعوام عقب الانفجار العظيم، كما تنبَّأَتِ النماذج الأبسط، لكنه بعد ذلك بدأ في التسارع ببطء.

الأمر يسير على النحو التالي (هناك تفسيرات ممكنة أكثر تعقيدًا من هذا للتسارع الكوني، لكن بما أن أبسط التفسيرات هو أجملها، فلن أناقش هذه التفسيرات المعقدة هنا). حقل لامدا ساكن، ويمتلك القيمة عينها منذ الانفجار العظيم. ولأننا نعجز عن رؤية هذا الحقل، فعادةً ما يُطلَق عليه اسم «الطاقة المظلمة». والطاقة المظلمة خاصية من خصائص الزمكان نفسه؛ لذا حين يتمدَّد المكان ويكون هناك المزيدُ من السنتيمترات المكعبة التي تحتاج إلى أن تُملَأ، لا تقل كثافة الطاقة المظلمة، وهذا يعني أن مقدار الطاقة المخزَّن في كل سنتيمتر مكعب من المكان يظل كما هو، وهو يمارس دومًا مقدار الدفع الخارجي عينه في كل سنتيمتر مكعب. وهذا يختلف تمامًا عمَّا يحدث للمادة مع تمدُّد الكون؛ فحين ظهر الكون إلى الوجود من الانفجار العظيم، كانت كثافة المادة في كل موضع تماثِل كثافتها اليوم في نواة الذرة. ومن شأن مقدارٍ يسير للغاية من هذه المادة أن يحتوي من الكتلة على ما يكافئ كلَّ البشر الموجودين على الأرض اليوم؛ ومن ثَمَّ فإن الجاذبية المرتبطة بتلك الكثافة للمادة كانت هي المهيمنة تمامًا على حقل لامدا. ومع مرور الوقت، تمدَّدَ الكون وصار نفسُ مقدارِ المادة يشغل حيِّزًا متزايدًا من المكان، وبالتبعية قلَّتْ كثافة المادة، وهذا يعني أن تأثير الجاذبية على التمدُّد صار يقلُّ تدريجيًّا، إلى أن صار أقل من تأثير الطاقة المظلمة.

ولتفسير مشاهدات المستعرات العظمى، لا بد أن تأثير المادة على التمدد — الذي يعمل على إبطاء التمدد — قد ضعف إلى درجةٍ صار فيها مساويًا لتأثير الطاقة المظلمة، التي تعمل على تسريع التمدد، وذلك منذ نحو خمسة أو ستة مليارات عام مضت. ومن منظور الإزاحة الحمراء، حدث التحوُّل بين إزاحةٍ حمراء قدرها ٠٫١ وإزاحةٍ قدرها ١٫٧، ومنذئذٍ صار تأثيرُ الطاقة المظلمة أكبرَ من تأثير المادة، وهو ما جعل تمدُّد الكون يتسارع.

إذا كان التمدُّد آخِذًا في التسارع، فمن تبعات ذلك أن يكون الكون أكبر قليلًا من الأربعة عشر مليار عامٍ المحسوبة على افتراض عدم وجود تسارُع؛ لأنه لو كان الكون يتمدَّد على نحوٍ أبطأ في الماضي، فمن المؤكد أنه استغرق وقتًا أطول كي يصل إلى حالته الراهنة. بَيْدَ أن هذا التأثير ضئيلٌ للغاية، وهو يعمل في الاتجاه الصحيح بحيث يحافظ على عمر الكون أكبر من أعمار أقدم النجوم؛ لذا ما من حاجة لأن نشغل أنفسنا به.

إن مقدار الطاقة المظلمة المطلوبة لعمل كل ذلك مقدار ضئيل. فمع الوضع في الاعتبار اكتشاف أينشتاين أن الطاقة والكتلة متكافئتان، فإن مقدار المادة المرتبطة بالطاقة المظلمة يقل قليلًا عن $١٠^{-٢٩}$ جرامات في كل سنتيمتر مكعب من الكون؛ أي ٠٫٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠١ جرام في كل سنتيمتر مكعب؛ لذا من المستحيل أن يجعل الأرض، أو المجموعة الشمسية، أو مجرَّة درب التبانة، أو حتى أحد العناقيد المجرية يتمدَّد ويتفكك؛ لأنه على النطاق المحلي ستتغلَّب عليه جاذبيةُ المادة المركَّزة على نحوٍ تامٍّ.

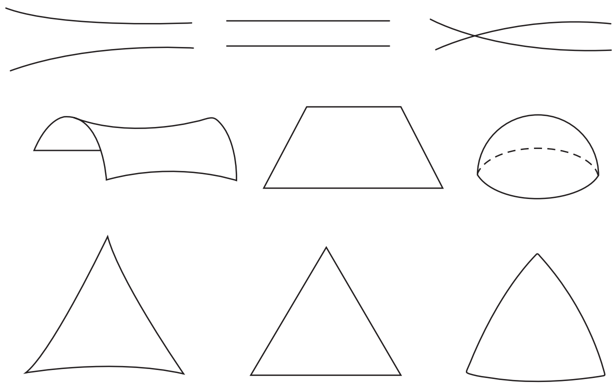
لكن على المستوى الكوني، فإن وجود هذا المقدار من الطاقة — وإن كان ضئيلًا — وكتلتها المكافئة، في «كل» سنتيمتر مكعب من الكون — حتى في كل «الفضاء الخاوي» بين النجوم والمجرَّات — يكون له تأثير بالغ؛ فهو يعني أن هناك من المادة على صورة طاقة مظلمة ما هو أكثر بكثير من المادة على صورة نجوم ومجرَّات ساطعة. كان هذا من شأنه أن يمثِّل مفاجأةً كبيرة لهابل ومعاصريه، الذين تصوَّروا أنهم كانوا يدرسون أهم مكونات الكون، لكن في نهاية تسعينيات القرن العشرين كان هذا هو المطلوب تمامًا؛ فبحلول ذلك الوقت كان من الجلي بالفعل أن هناك في الكون ما لا تدركه أعيننا، وكان علماء الكونيات يحاولون بالفعل العثور على ما يُسمَّى «الكتلة المفقودة»، وقد تبيَّنَ أن حقل لامدا هو القطعة المفقودة التي أكملت الصورة الحديثة للكون، الصورة التي تقدِّم هيكلًا عامًّا يمكننا داخله تفهُّمُ أصل المجرَّات وتطوُّرها، وهو الأمر الذي لا يزال على أي حال يمثِّل أهميةً بالغةً لأشكال الحياة مثلنا.

الفصل السادس

العالم المادي

مِمَّ تتكون المجرَّات؟ الإجابة الواضحة هي أنها تتكون من النجوم الحارة الساطعة، وسُحُب الغاز والغبار الباردة المظلمة. وهذه بالأساس هي نفس نوعية المادة التي تتكوَّن منها الأرض، وتتكون منها أجسادنا؛ وأعني بهذا: المادة الذرية. والذرات تتكون من نوًى كثيفة، مكوَّنة من بروتونات ونيوترونات، تحيط بها سُحُبٌ من الإلكترونات، بحيث يقابل كلَّ بروتونٍ داخل النواة إلكترونًا داخل السحابة. وداخل النجوم، تُنتزَع الإلكترونات بعيدًا عن النوى كي تشكِّل نوعًا من المادة يُعرَف باسم البلازما؛ بَيْدَ أنها لا تزال في جوهرها نفس نوعية المادة العادية. البروتونات والنيوترونات تنتمي إلى عائلةٍ من الجسيمات تُعرَف إجمالًا باسم الباريونات، وكثيرًا ما يُستخدَم مصطلح «المادة الباريونية» من جانب الفلكيين للإشارة إلى المادة التي تتكون منها النجوم وسحب الغاز والكواكب والبشر. أما الإلكترونات فهي تنتمي إلى عائلة أخرى تُعرَف باسم اللبتونات، لكن بما أن كتلة الإلكترون أقل من واحد على الألف من كتلة البروتون أو النيوترون، فإن الباريونات تهيمن من حيث الكتلة على هذا النوع من المادة المألوفة.

أحد الإنجازات الاستثنائية لعلم الكونيات الحديث هو أنه قادر على أن يخبرنا بمقدار المادة الباريونية الموجودة في الكون؛ أو بالأحرى، يخبرنا بما يجب أن يكون عليه متوسط كثافة تلك المادة على مستوى الكون. واستنادًا إلى النسبية العامة، يقيس علماءُ الكونيات مثلَ هذه الكثافات باستخدام مُعامل يحمل اسم الحرف اليوناني أوميجا (Ω)، والذي يرتبط بالانحناء الكلي للمكان. وأيسر وسيلة لفهم هذا الأمر هو تشبيه الانحناء الثلاثي الأبعاد للمكان بالطريقة التي يمكن بها لسطح ثنائي الأبعاد أن ينحني. إن سطح الأرض مثال على سطح مغلَق، منحنٍ على نفسه. على سطح مغلق كهذا، إذا تحرَّكتَ في الاتجاه ذاته لفترة كافية من الوقت، فسينتهي بك المطاف إلى نفس النقطة



شكل ٦-١: قد يتوافق المكان مع أحد هذه الأشكال الهندسية الثلاثة. وهي ممثَّلة هنا بواسطة أشكال مكافئة لها في بُعْدَين.

التي بدأت منها. أيضًا هناك مثالٌ على السطح المفتوح، وهو شكل السرج، الذي يمكن بسطه إلى ما لا نهاية في جميع الاتجاهات. وبين هاتين الإمكانيتين تمامًا هناك السطح المنبسط، الشبيه بسطح مكتبي، الذي ليس به أيُّ انحناء على الإطلاق. تخبرنا معادلات أينشتاين بأنه اعتمادًا على مقدار المادة التي يحتوي عليها المكان، فإن المكان الثلاثي الأبعاد الخاص بنا يمكن أن يكون إما مغلقًا، كما في حالة السطح الثنائي الأبعاد لكرة، وإما مفتوحًا، كسرج الحصان، وإما منبسطًا، كسطح المكتب. الكون المنبسط يتوافَق مع قيمةٍ مقدارها ١ لُمعامل الكثافة أوميجا، أما الكون المغلَق فيتطلب كثافةً أعلى للمادة، فيما يتطلَّب الكون المفتوح كثافةً أقلَّ للمادة. يقيس علماء الكونيات الكثافات كنسبة مئوية من هذا المُعامل. على سبيل المثال، إذا كان مقدار المادة الباريونية في الكون نصفَ المقدار المطلوب كي يكون الكون منبسطًا (وهو ما ليس عليه الحال)، فهنا نقول إن Ω(المادة الباريونية) = ٠٫٥.

كل المادة الباريونية الموجودة في الكون جرى تصنيعها في الانفجار العظيم، من الطاقة الصافية بما يتفق والمعادلة: الطاقة تساوي الكتلة مضروبةً في مربع سرعة

الضوء، والتي يمكن بطبيعة الحال أن تُعاد كتابتها على نحو معكوس؛ بحيث إن الكتلة تساوي الطاقة مقسومةً على مربع سرعة الضوء. إن حسابَ مقدار المادة الباريونية المُنتَجة في الانفجار العظيم عمليةٌ يسيرة للغاية، بشرط أن نكون على يقين من أن حرارة الانفجار العظيم كانت تبلغ مليار درجة على الأقل، والدليل على هذا يأتينا من هسيس الضوضاء الراديوية الضعيف الذي يمكن رصده قادمًا من كل الاتجاهات من الفضاء. فهذه الخلفية من الضوضاء الراديوية تُفسَّر بوصفها الإشعاع المتخلِّف عن الكرة النارية للانفجار العظيم ذاته، وقد أُزِيحت إزاحة حمراء بمعاملٍ قدره ألف، بحيث باتت تظهر الآن على صورة إشعاع ميكروني ذي درجة حرارة قدرها ٢٫٧ درجة فوق الصفر المطلق (٢٫٧ درجة كلفينية)، ومن هذه المشاهدات يمكننا العودة بالزمن إلى الوراء لحساب الحرارة التي كان عليها الكون في أي زمن في الماضي، حين كان أصغر حجمًا ومن ثم أقلَّ من حيث الإزاحة الحمراء. فبعد مرور ثانية واحدة على مولد الزمن، كانت درجة الحرارة ١٠ مليارات درجة كلفينية، وبعد مائة ثانية من البداية كانت تبلغ مليار درجة كلفينية، وبعد ساعة واحدة قلَّت الحرارة إلى ١٧٠ مليون درجة كلفينية. وعلى سبيل المقارنة، تبلغ درجة الحرارة في قلب الشمس نحو ١٥ مليون درجة مئوية.

في مثل هذه الظروف تكون المادة في حالة بلازما، كما الحال داخل الشمس، ويُتقاذَف الإشعاع بين الجسيمات المشحونة كهربيًّا. وإشعاع الخلفية الميكروني نفسه يأتينا من زمنٍ تلا بداية الكون بنحو ٣٠٠ ألف عام، حين كان الكون قد برد لبضعة آلاف درجة كلفينية، بما يساوي تقريبًا حرارة سطح الشمس اليوم. بعد ذلك، ارتبطت الإلكترونات السالبة الشحنة بالبروتونات الموجبة الشحنة داخل الذرات المتعادلة الشحنة، وصار بإمكان الإشعاع التدفُّق عبر الفضاء، تمامًا مثلما يتدفق من سطح الشمس.

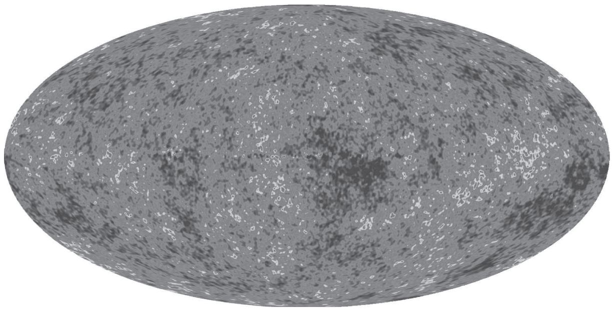
إن الظروف في المراحل اللاحقة لهذه الكرة النارية الكونية مشابهة للغاية للظروف داخل القنابل النووية المنفجرة، والتي خضعت للدراسة على كوكب الأرض. وقد تمكَّنَ علماء الكونيات، متسلِّحين بفهمهم للكيفية التي تعمل بها الانفجارات النووية، من حساب أن الخليط الباريوني الذي ظهر من الانفجار العظيم كان يتكوَّن في نحو ٧٥ بالمائة منه من الهيدروجين، و٢٥ بالمائة من الهليوم، مع آثار طفيفة من الليثيوم. لكن من الطريقة التي تتفاعل بها الجسيمات الباريونية مع الضوء تحت الظروف المتطرفة، ومن قياسات إشعاع الخلفية الكوني، يستطيع علماء الكونيات أيضًا حساب أن المقدارَ الإجمالي للمادة الباريونية المنتجة في الانفجار العظيم، والموجودَ في الكون؛ يبلغ فقط

٤ بالمائة من الكثافة التي يتطلَّبها الكون المنبسط. بعبارة أخرى: Ω(المادة الباريونية) = ٠٫٠٤.

الخطوة البديهية التالية هي مقارنة هذا التنبؤ لمقدار المادة الباريونية الموجود في الكون بالمقدار الذي يمكننا رؤيته في المجرَّات والنجوم الساطعة، وهذه عملية حسابية تقريبية مبنية على فهمنا لسطوع النجوم وكتلها وعلى عدد النجوم الموجودة في المجرَّات؛ بَيْدَ أنها تشير إلى أن نحو خُمْس المادة الباريونية — أي أقل من واحد بالمائة من المقدار الإجمالي للمادة المطلوبة كي يكون الكون منبسطًا — موجودٌ في المادة الساطعة، بينما الأربعة أخماس الأخرى موجودة في سحب الغاز والغبار الموجودة بين النجوم، أو ربما على صورة نجوم ميتة مُنطَفِئة، وبعض هذا موجود على صورة نوع من الضباب الشفاف من الهيدروجين والهليوم يحيط بالمجرَّات مثل مجرتنا. ومع ذلك، كما ذكرت من قبلُ، فنحن نعلم من الكيفية التي تدور بها المجرَّات حول نفسها، ومن الكيفية التي تتحرك بها عبر الفضاء، أنها واقعةٌ تحت هيمنة مقدارٍ من المادة أعظم كثيرًا من هذا. وهذه المادة يمكن فقط أن تكون مادةً مظلمة باردة غير باريونية من نوعٍ ما، تتألَّف من جسيم أو جسيمات لم يسبق أن جرى اكتشافها في أي تجربة على الأرض من قبلُ قطُّ. يُطلَق على هذه المادة اسم: «المادة المظلمة الباردة»، ويُعَدُّ رصد هذه المادة أحدَ المهام الأكثر إلحاحًا أمام فيزيائيِّي الجسيمات اليوم.

تأتينا الأدلة على وجود المادة المظلمة الباردة من الكيفية التي تتحرك بها المجرَّات؛ كيفية دورانها حول نفسها وكيفية تحرُّكها عبر الفضاء. من الممكن قياس دوران أي مجرَّة قرصية باستخدام تأثير دوبلر المألوف، الذي يبيِّن الكيفية التي تتحرك بها النجوم الموجودة على الجانب الآخَر من المجرَّة مقتربةً منَّا مع دوران المجرَّة، بينما النجوم الموجودة على الجانب الآخَر تتحرك مبتعدة عنَّا، وهذا يصلح فقط في حالة المجرَّات التي تُرى من جهة الحافة تقريبًا، لكنَّ هناك عددًا وفيرًا من هذه المجرَّات للدراسة. إن تأثير دوبلر يزيد الإزاحة الحمراء على أحد جانبَي القرص، بينما يقلِّلها على الجانب الآخَر؛ وبذا يبيِّن قياسُ الإزاحة الحمراء في مواضع مختلفة على امتداد القرص الكيفيةَ التي تتحرك بها النجوم حول مركز المجرَّة. النقطة الحاسمة هنا هي أنه خارج النواة المركزية للمجرَّة القرصية، حيث تحدث أمور أخرى مثيرة للاهتمام، تكون سرعة الدوران ثابتةً على طول المسافة نحو حافة القرص المرئي؛ فكل النجوم في القرص تتحرك بالسرعة

عينها من حيث الكيلومتر لكل ثانية، وهذا يختلف تمامًا عن الكيفية التي تدور بها كواكب المجموعة الشمسية في مداراتها حول الشمس.

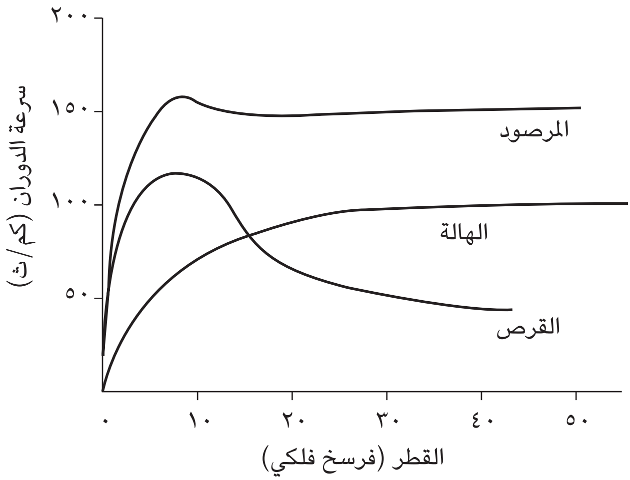


شكل ٦-٢: الخريطة الميكرونية للسماء كما صوَّرها مسبار ويلكينسون لقياس تبايُن الأشعة الكونية.

الكواكب أجرام صغيرة تدور حول كتلة مركزية ضخمة، وتهيمن جاذبية الشمس على حركتها؛ ولهذا السبب فإن السرعة التي تتحرك بها الكواكب، بالكيلومتر لكل ثانية، تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بينها وبين مركز المجموعة الشمسية. يبعُد المشتري عن الشمس مسافةً أكبر من تلك التي يبعدها كوكب الأرض عنها؛ ومن ثَمَّ فهو يتحرك على نحوٍ أبطأ من كوكب الأرض، كما أن مداره حول الشمس أكبر. لكن جميع النجوم في قرصِ أيِّ مجرَّة تتحرك بالسرعة عينها. لا تزال النجوم البعيدة عن المركز لها مدارات أكبر؛ ومن ثَمَّ فهي لا تزال تستغرق وقتًا أكبر كي تتمَّ دورة كاملة حول المجرَّة؛ بَيْدَ أن النجوم كلها تتحرك بالسرعة المدارية عينها عبر الفضاء.

وهذا تحديدًا هو نمط السلوك المتوافق مع الحركة المدارية لأجسام خفيفة نسبيًّا مطمورة داخل مقدار أكبر من المادة الممارسة لقوة الجاذبية؛ مثل حبات الزبيب التي تدور داخل رغيف من خبز الزبيب. والنتيجة الطبيعية هي أن المجرَّات القرصية، بما فيها مجرَّة درب التبانة، تدور داخل سُحُبٍ أكبر بكثير، أو هالات، من مادة مظلمة غير مرئية. إنها مادة منتشرة من نوعٍ ما؛ لذا لا بد أن تكون على صورة جسيمات أشبه بجسيمات الغاز، التي لها كتلةٌ وتؤثِّر على المادة المعتادة تأثيرًا جذبيًّا، لكنها لا تتفاعل

مع المادة المعتادة بأي طريقة أخرى (على سبيل المثال، من خلال الكهرومغناطيسية) وإلا كُنَّا قد لاحظناها. في هذه الصورة، تكون جسيمات المادة المظلمة الباردة موجودةً في كل مكان، بما في ذلك المكان الذي تقرأ فيه هذه الكلمات، وهي تمر باستمرار عبر جسدك دون أن تؤثِّر فيه. فهناك آلاف، وربما عشرات الآلاف، من جسيمات المادة المظلمة الباردة في كل متر مكعب من كل شيء، وأيضًا في كل متر مكعب من «العدم»، وهو ذلك المسمَّى الذي يُطلَق على الفضاء الخاوي.



شكل ٦-٣: تمثيل تخطيطي لـ «منحنى الدوران» التقليدي الذي يُرَى في أي مجرَّة قرصية.

أيضًا تكشف المادة المظلمة الباردة عن وجودها من خلال تأثيرها على العناقيد المجرِّيَّة، ومن الممكن استخدام إزاحة دوبلر التي لا تُقدَّر بثمنٍ كي نعرف الطريقة التي تتحرك بها المجرَّات المنفردة داخل العناقيد المجرِّيَّة نسبةً إلى مركز العنقود، ونطاق السرعات الخاص بكل المجرَّات داخل أي عنقود. إن العناقيد المجرِّيَّة توجد فقط بفضل الجاذبية التي تحافظ على تماسكها، ودون الجاذبية كان من شأن تمدُّد الكون أن يسحب المجرَّات بعضها بعيدًا عن بعض وينشرها عبر الفضاء، لكنَّ هناك حدودًا لمقدار تأثير قيد الجاذبية هذا. فإذا ألقيت كرةً في الهواء، فستعاود الكرة السقوطَ إلى الأرض؛ لأن

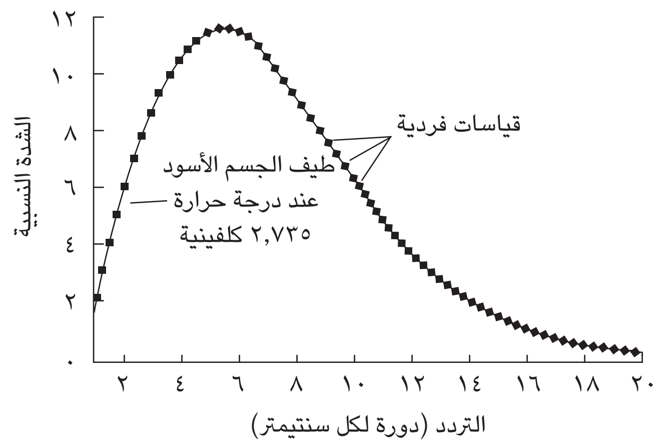
الجاذبية تسحبها لأسفل، لكن إذا تمكَّنْتَ من إلقاء الكرة بقوة كافية فستفلت من كوكب الأرض تمامًا وتواصل طريقها عبر الفضاء. يُطلَق على الحد الأدنى من السرعة الرأسية المطلوب لعمل ذلك اسم: «سرعة الإفلات»، وهي تعتمد فقط على كتلة الجسم الذي تحاول الإفلات منه ومدى بُعْدك عن مركز الكتلة. على سطح الأرض تبلغ سرعة الإفلات ١١٫٢ كيلومترًا في الثانية، وإذا جمعت الكتل الخاصة بكل المجرَّات الموجودة داخل العنقود المجري، والتي يُستدَلُّ عليها من واقع سطوعها — مع تضمين هامشٍ ملائمٍ لهالات المادة المظلمة الخاصة بها — يمكننا حساب سرعة الإفلات من العنقود المجري. ويتضح لنا أنه كي يحافظ العنقود على قبضته الجذبية على المجرَّات الموجودة به، فلا بد من أن يكون هناك المزيد من المادة المظلمة في «الفضاء الخاوي» الموجود بين المجرَّات، إضافةً إلى المادة المظلمة الموجودة في الهالات الخاصة بالمجرَّات المنفردة؛ فالكون كله مملوءٌ بضباب غير مرئي من المادة المظلمة الباردة.

بوضع كل هذه الأدلة معًا، من الممكن أن نحسب أن هناك من المادة المظلمة الباردة في الكون ما يساوي ستة أضعاف المادة الباريونية. بعبارة أخرى: Ω(المادة المظلمة الباردة) = ٠٫٢٣. وبإضافة هذا الرقم إلى المقدار المعروف للمادة الباريونية في الكون، نجد أن ٢٧ بالمائة من مقدار المادة المطلوب لجعل الكون منبسطًا قد تمَّ الوفاء به؛ أي إن Ω(المادة) = ٠٫٢٧.

كان من الممكن أن يسبِّب هذا إحراجًا لعلماء الكونيات؛ لأنه وقتَ تنقيحِ هذه الحسابات حتى مستوى الدقة الذي أوردتُه هنا، في حدود نهاية القرن العشرين، كانت هناك أدلة أخرى على أن الكون منبسطٌ بالفعل. وقد جاءت هذه الأدلة من دراسات إشعاع الخلفية الميكروني الكوني، التي أجرتها المعدات المحمولة على المناطيد والأقمار الصناعية التي تحلِّق فوق طبقات الغلاف الجوي الحاجبة. وهذه المعدات تتمتع في وقتنا الحالي بدرجة عالية من الدقة؛ بحيث إنها تستطيع التقاط أيِّ تفاوتاتٍ في حرارة الإشعاع من مكانٍ لآخَر في السماء، بحيث ترصد البقع الحارة والباردة (نسبيًّا) التي انطبعت على الإشعاع حين كان عمر الكون بضع مئات الآلاف من الأعوام.

قبل أن يبرد الكون إلى النقطة التي أمكن فيها للذرات المتعادلة كهربيًّا أن تتكون، كان الإشعاع والجسيمات المشحونة كهربيًّا للمادة مرتبطة معًا بطريقةٍ ما، بحيث إن الاختلافات في كثافة المادة في الأماكن المختلفة من الكون كانت مرتبطةً باختلافات في درجة حرارة الإشعاع. وبعد نحو ٣٠٠ ألف عام على الانفجار العظيم، حين برد الكون

إلى درجة الحرارة الحَرِجة، انفصل الإشعاع والمادة كلٌّ منهما عن الآخر، وتُرِك الإشعاع وهو مطبوع عليه نمطٌ من البقع الحارة والباردة تتوافق مع نمط تفاوتات الكثافة في المادة الباريونية في ذلك الوقت؛ وكأنه حفرية للتوزيع الواسع النطاق للباريونات عند وقت الانفصال. ولأن الضوء يتحرك بسرعة محدودة، ففي خلال ٣٠٠ ألف عام لا يمكنه أن يقطع أكثر من ٣٠٠ ألف سنة ضوئية؛ لذا في الوقت المنقضي بين الانفجار العظيم وبين الانفصال كانت أكبر مناطق الكون التي أمكنها أن تتسم بأي مقدار من التجانس الداخلي قد نمت بحيث بلغ حجمها ٣٠٠ ألف سنة ضوئية عرضًا، وهذا يعني أن أكبر الرقع المتجانسة التي يمكن رؤيتها في خريطة إشعاع الخلفية في السماء، تتوافق مع الرقع الكونية التي كان حجمها ٣٠٠ ألف سنة ضوئية عرضًا عند وقت الانفصال.



شكل ٦-٤: طيف إشعاع الخلفية الكوني المقيس بواسطة القمر الصناعي «مستكشف الخلفية الكونية».

ومنذ ذلك الوقت تدفَّقَ الإشعاع عبر الفضاء دون أن يتفاعل مباشَرةً مع المادة؛ بَيْدَ أنه تأثَّرَ بانحناء المكان. نحن نعلم أن الأجرام الضخمة كالشمس تحني الضوء المارَّ قرب حافتها، وهذا مشابه للغاية للكيفية التي تحني بها العدسةُ أشعةَ الضوء؛ فالعدسات

يمكنها أن تجعل صور الأجسام البعيدة تبدو أكبر من حقيقتها (كما الحال عند النظر عبر التليسكوب)، أو أصغر (كما الحال عند النظر من الطرف الآخَر للتليسكوب)، ويستطيع الزمكان المنحني عملَ الشيء ذاته، اعتمادًا على طبيعة الانحناء. وباستخدام النسبية العامة، يكون من الممكن حساب مقدار الكبر الذي ينبغي أن تكون عليه أكبر البقع المتجانسة في إشعاع الخلفية في نظر معدَّاتنا اليوم، لو أن مساحتها كانت تبلغ ٣٠٠ ألف سنة ضوئية عرضًا وقت الانفصال. يعتمد الحجم المرصود على الانحناء الفعلي، لكن لو كان الكون مفتوحًا فمن المفترض أن نرى تضخيمًا، وإذا كان مغلقًا فمن المفترض أن نرى بقعًا أصغر حجمًا، أما لو كان منبسطًا، فينبغي ألَّا يكون هناك أي تأثير. وتبيِّنُ القياسات أن الكون منبسطٌ بشكل مؤكَّد تقريبًا، لكنه قد يكون منغلقًا بدرجة بسيطة. بعبارة أخرى: $\Omega = ١$.

لكننا، مع ذلك، نعرف أن المقدار الإجمالي للمادة في الكون يقلُّ عن ثُلث المقدار المطلوب كي يكون الكون منبسطًا. كان من الممكن أن يكون هذا الأمر مصدرَ إحراجٍ كبير، لكن في الوقت الذي بدأ فيه قلق علماء الكونيات بشأن هذا اللغز، بيَّنت الدراسات الخاصة بالمستعرات العظمى أن تمدُّدَ الكون آخِذ في التسارع، والمقدار الذي يتسارع به تمدُّد الكون يتطلَّب وجود ثابت كوني — الطاقة المظلمة المعروفة باسم لامدا (Λ) — ذي قوة معينة، وهذا يتوافق مع كثافة كتلة تكافئ ٧٣ بالمائة من كثافة الكتلة المطلوبة لجعل الكون منبسطًا. بعبارة أخرى: $\Omega(\Lambda) = ٠٫٧٣$، وكان هذا هو المطلوب بالضبط. لم يَعُدِ اكتشاف أن Ω(المادة) = ٠٫٢٧ مصدرًا للإحراج، بل تحوَّلَ إلى انتصار. وعند وضع كل شيء في الاعتبار، سيكون لدينا معادلة بسيطة للغاية، وحقيقية جدًّا، وهي:

Ω = Ω(المادة الباريونية) Ω(المادة المظلمة الباردة)

\+ Ω(الطاقة المظلمة)

= ٠٫٠٤ + ٠٫٢٣ + ٠٫٧٣

= ١

كان السيد ميكوبر (من رواية ديفيد كوبرفيلد) سيقول عن هذا: «النتيجة، السعادة.» ولأسباب بديهية، تُعرَف هذه الحزمةُ كلها باسم «علم كونيات المادة والطاقة المظلمة»، وهو أحد الانتصارات العظيمة للعلم.

المرحلة التالية في تطوير فهمنا للكون — وهو الأمر الذي لا يزال لم يكتمل بعدُ — هي تفسير أصل نوعية المجرَّات التي نراها في الكون في إطار علم كونيات المادة والطاقة المظلمة. لكن قبل أن نتمكَّن من عمل هذا نحتاج إلى إحصاء محتويات العالم المادي — أي الأنواع المختلفة من المجرَّات التي علينا تفسير منشئها — نظرًا لأن هذه المجرَّات، للأسف، لا تنقسم على نحوٍ تامٍّ إلى مجرَّات قرصية وأخرى بيضاوية.

الأجزاء المرئية للمجرَّات الحلزونية كمجرَّة درب التبانة تشكِّل البنية الكلاسيكية ذات الجزأين الخاصة بالقرص والانتفاخ النووي المركزي، مع أنه في بعض الحالات يكون الانتفاخ صغيرًا للغاية. الأذرع الحلزونية هي خصائص القرص الأكثر وضوحًا للعين، لكن الكمية الضخمة من الغبار والغاز تماثلها في الأهمية؛ لأنها تمثِّل المادة الخام لتكوُّنِ النجوم الفتِيَّة الحارة بالقرص، والمعروفة باسم: «نجوم التصنيف ١». أما النجوم الموجودة داخل الانتفاخ المركزي وفي العناقيد الكروية حول أي مجرَّة قرصية، فهي النجوم الأقدم المعروفة باسم: «نجوم التصنيف ٢». قد تمتلك المجرَّات الحلزونية قضبانًا مركزية، وقد لا تمتلك، وقد تكون هذه القضبان ملمحًا مؤقتًا يظهر لدى كل المجرَّات الحلزونية في وقتٍ ما من تطوُّرها. المجرَّات الأشد سطوعًا هي مجرَّات حلزونية، ومن المتفق عليه الآن أن كل المجرَّات القرصية بها ثقوب سوداء في قلوبها، كذلك الثقب الموجود في مركز مجرَّة درب التبانة. وقد تحتوي أكبر المجرَّات الحلزونية على ما يصل إلى ٥٠٠ مليون نجم.

المجرَّات القرصية العديمة الأذرع الحلزونية (التي تُعرَف أحيانًا، لأسباب تاريخية، بالمجرَّات العدسية) لا تزال تملك بنية القرص والانتفاخ الأساسية، لكنها تفتقد سُحُبَ الغبار. وهذه المجرَّات تتألَّف في أغلبها من «نجوم التصنيف ٢»، ونستنتج من هذا أنها استهلكت كلَّ المادة المكوِّنة للنجوم واستقرت في مرحلة كهولة هادئة. والمجرَّات العدسية البعيدة التي تُرَى من زوايا مختلفة يمكن بالكاد التمييزُ بينها وبين المجرَّات البيضاوية، لكن لو أمكن قياس دورانها من خلال تأثير دوبلر فسيكون هذا مؤشرًا أكيدًا على طبيعتها الحقيقية كمجرَّات عدسية.

المجرَّات البيضاوية لا تدور حول نفسها ككل، وإنما تدور نجومٌ منفردة فيها حول مركز المجرَّة. في المجرَّات البيضاوية القريبة التي يمكن دراستها تفصيلًا يكون

من الممكن تبيُّن تيارات من النجوم تسير في مدارات مختلفة صوب اتجاهات مختلفة، على غرار تيارات النجوم الموجودة في مجرَّة درب التبانة ولكن بحجم أكبر. وهذا التنوع من تيارات النجوم ذات الاتجاهات المختلفة هو ما يعطي المجرَّات البيضاوية شكلَها الإجمالي الذي هو — تحديدًا — أشبه بالكرة الممطوطة أو المنضغطة. تهيمن على هذه المجرَّات «نجوم التصنيف ٢» القديمة، وهي من الظاهر تبدو شبيهةً بانتفاخ المجرَّة القرصية لكن دون قرص. بعض المجرَّات البيضاوية على الأقل تحوي غبارًا، عادةً في الحلقات الموجودة حول مركز المجرَّة، لكن لا تحدث في هذه الحلقات عمليةُ تكوُّنِ النجومِ بصورة كبيرة في الوقت الحاضر. ومع أن أشد المجرَّات سطوعًا هي المجرَّات الحلزونية، فإن أكبر المجرَّات حجمًا هي المجرَّات البيضاوية العملاقة التي تحوي أكثر من تريليون نجمٍ، ويبلغ عرضها مئات من الكيلو فرسخ الفلكي. لكن أصغر المجرَّات في الكون أيضًا يبدو أنها مجرَّات بيضاوية، وتحوي فقط بضعة ملايين من النجوم، وعادةً ما يكون عرضُها كيلو فرسخًا فلكيًّا واحدًا أو نحو ذلك، وأصغر هذه المجرَّات القزمة تناهز أكبر العناقيد النجمية الكروية في الحجم، وهو ما يُعَدُّ دليلًا على الأرجح على أصل العناقيد الكروية. ولا يمكننا رؤية مثل هذه المجرَّات البالغة الصغر إلا في المناطق القريبة منَّا؛ حيث إن نصف المجرَّات العشرين أو نحو ذلك القريبة منَّا هي مجرَّات بيضاوية قزمة، ومن المرجح بشدة أن تكون أغلب المجرَّات في الكون مجرَّات قزمة كهذه، لكننا نعجز عن رؤيتها بسبب وقوعها على مسافات عظيمة.

أي مجرَّة لا تندرج تحت وصف المجرَّات البيضاوية أو القرصية تُصنَّف على أنها مجرَّة غير منتظمة، والمجرَّات غير المنتظمة تحتوي عادةً على مقدار كبير من الغبار والغاز، تجري فيه عمليةُ تكوُّنٍ نَشِطة للنجوم. ولأنه لا توجد بِنية محددة جيدًا كبنية المجرَّات الحلزونية، فإن هذا يُنتج رقعًا من مناطق تكوُّن النجوم في أرجاء المجرَّة، وهو ما يعطيها مظهرًا مرقَّعًا غير منتظم في الصور الفوتوغرافية. كان من المعتاد تصنيف سحابتَيْ ماجلان — وهما مجرَّتان صغيرتان واقعتان في أسر قبضة الجاذبية الخاصة بدرب التبانة — على أنهما مجرتان غير منتظمتَيْن، لكن وُجِد الآن أن لهما بِنية حلزونية قضيبية أساسية، تصعب رؤيتها بسبب الطبيعة غير المنتظمة لعملية تكوُّن النجوم. وبعض المجرَّات غير المنتظمة قد يكون بقايا أو أجزاءً من مجرَّات أكبر تفتتت مدِّيًّا بفعل اقترابها عن كثب من مجرَّات أخرى، ومثل هذه المقابلات القريبة يمكن رؤيتها وهي تحدث في أرجاء الكون. وفي بعض الحالات، يمكن رؤية المجرَّات وهي تمر بجوار مجرَّات

أخرى، فتستطيل وتتشوَّه بفعل القوى المدِّيَّة، وفي أمثلة أخرى، تتصادم المجرَّات بعضها ببعض، وقد تندمج معًا خلال هذه العملية؛ وهو دليل مهم — كما سنرى — بشأن أصل أنواع المجرَّات التي نراها حولنا.

يمكن أيضًا أن تتسبَّب المقابلات بين المجرَّات في حدوث فوراتٍ ضخمة من عمليات تكوُّن النجوم، وهي العمليات التي يشير إليها الفلكيون، على نحو مبتذل، باسم الانفجارات النجمية. لا يوجد تعريفٌ رسمي لمجرَّة الانفجار النجمي، لكنها تلك المجرَّة التي يكون فيها معدلُ تكوُّنِ النجوم عظيمًا للغاية، لدرجة أن كلَّ الغاز والغبار المتاح سيُستهلَك في وقتٍ أقصر بكثير من عمر الكون؛ ومن ثَمَّ لا بد أنها ظواهر عابرة. في بعض مجرَّات الانفجار النجمي تتكوَّن النجوم بمعدلٍ يبلغ مئات الكتل الشمسية في العام، وهو أسرع بنحو مائة مرة من معدل تكوُّن النجوم في مجرتنا، ومن شأن هذا أن يستهلك كل المادة المتاحة في غضون نحو مائة مليون عام؛ أي أقل من ١ بالمائة من عمر الكون.

بعض مجرَّات الانفجار النجمي — خاصة الصغيرة منها — تبدو شديدة الزرقة؛ لأن الضوء القادم منها يهيمن عليه ضوءُ النجوم الحارة الفتِيَّة الزرقاء. وهذه المجرَّات تحتوي على القليل من الغبار، وهو ما نتج على الأرجح من تعرُّضها لاضطرابٍ بسبب التفاعل أو الاندماج مع منظومة نجمية أخرى، والذي استثار سُحُبَ الغاز الغبارية وأطلق عملية تكوُّن النجوم المتفجِّرة التي استنزفت هذا المخزون. تحدث عمليات تكوُّنِ النجوم المتفجرة داخل هذه المجرَّات في عناقيد مكتنزة من النجوم يصل عرضها إلى ٢٠ سنة ضوئية (٦ أو ٧ فراسخ فلكية)، وهي أشد سطوعًا من شمسنا بمائة مليون مرة. على الطرف الآخَر من المقياس، بعض مجرَّات الانفجار النجمي تكون كبيرةَ الحجم للغاية وشديدةَ الحُمرة، ويتم رصدها على الأطوال الموجية للأشعة تحت الحمراء باستخدام معدات محمولة إلى الفضاء على الأقمار الصناعية؛ وسبب هذا هو أنها محاطة بكميات هائلة من الغبار، الذي يمتص الضوء الصادر عن النجوم الفتِيَّة داخل المجرَّة، ويعيد إشعاعه على أطوال موجية للأشعة تحت الحمراء. تخترق تليسكوبات الأشعة السينية الغبار مباشَرةً، وتكشف عن أن الكثير من مجرَّات الانفجار النجمي هذه لها قلوبٌ نَشِطة مزدوجة، وهذا يشير إلى أنها ربما تكوَّنَتْ نتيجة اندماج مجرَّتَيْن معًا. إن القلب المزدوج يتكوَّن من ثقبين أسودين، كلٌّ منهما قادمٌ من إحدى المجرتين المندمجتين، لكنهما لم يندمجا بعدُ. وقد وُجِد أن مجرَّات الانفجار النجمي شائعة الوجود؛ وذلك حين امتلك الفلكيون التكنولوجيا التي تمكِّنهم من النظر إليها، وعرفوا ما عليهم أن يبحثوا عنه.

أيضًا يفسِّر وجودُ الثقوب السوداء في قلوب هذه المجرَّات السببَ وراء إظهار بعض هذه المجرَّات علاماتٍ على النشاط العنيف في نُوَيَّاتها، مع حدوث انفجارات تطيح بالمادة للخارج نحو الفضاء. اكتُشِفت هذه الأجرام تدريجيًّا على مدار عقود عديدة، باستخدام أنواع مختلفة من الرصد التليسكوبي في أجزاء مختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي؛ كالضوء المرئي والموجات الراديوية، والأشعة تحت الحمراء، والأشعة السينية، وهكذا. ونتيجة لذلك، مُنِحت هذه الأجرامُ العديدَ من الأسماء المختلفة، لكن يُعتقَد الآن أنها كلها أفرادٌ في عائلة وحيدة؛ ومن ثَمَّ يضمُّ المسمَّى الشامل «نواة المجرَّة النَّشِطة» مجموعةً متنوعة من هذه الأجرام التي تحمل أسماءً على غرار «مجرَّات زايفرت»، و«المجرَّات إن»، و«أجرام لاسرتا»، و«المجرَّات الراديوية»، و«النجوم الزائفة». ويُعتقَد الآن أن هذه الأجرام كلها تحصل على طاقتها بفضل العملية نفسها، التي تتضمَّن سقوط المادة في (أو على) ثقب أسود فائق الضخامة، بحيث يكون الاختلاف في درجة شدة هذه العملية، لا في نوعها.

حين تسقط المادة على ثقب أسود تتحرَّر طاقة الجاذبية المرتبطة بها، وتتحول إلى طاقة حركة مع زيادة سرعة المادة. والأمر عينه يحدث على مقياس أصغر إذا ألقيتَ شيئًا من نافذة الطابق العلوي؛ فالجسم يسقط إلى الأسفل بسرعة متزايدة بينما يتم تحويلُ طاقة الجاذبية إلى حركة، وبعد ذلك حين يرتطم بالأرض تتحول طاقةُ الحركة إلى حرارة، تتقاسمها الجزيئات الموجودة في الأرض، والتي تتحرك بشكل أسرع قليلًا بينما يسخن ذلك الجزء من الأرض قليلًا. وتستفيد تقنيةُ «النقطة الساخنة» المستخدَمة في النقل التليفزيوني للأحداث الرياضية كمباريات الكريكيت من هذا؛ كي تبيِّن تحديدًا الموضعَ الذي ضربته الكرة.

أيضًا تتصادم جسيماتُ المادة الساقطة داخل الثقب الأسود بعضها مع بعض، وتزداد حرارتها بينما تندفع إلى الثقب، مكوِّنةً قرصًا دوَّارًا من المادة الحارة يُعرَف باسم: «القرص المزوِّد». إن مجال جاذبية الثقب الأسود شديدٌ للغاية، لدرجة أنه من الممكن إطلاق مقدار كبير من الطاقة بهذه الطريقة؛ ما يصل إلى ١٠ بالمائة من طاقة الكتلة — الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء — الخاصة بالمادة الساقطة في الثقب. وإذا كان الثقب الأسود المركزي للمجرَّة له كتلة مقدارها مائة مليون مرة قدر كتلة الشمس فقط — أيْ نحو ٠٫١ بالمائة من كتلة كل النجوم الساطعة الموجودة في المجرَّة المحيطة مجتمعةً — فلن يحتاج إلا لابتلاع ما يعادل نجمَيْن في حجم الشمس كلَّ عامٍ؛ كي يوفِّر ناتج الطاقة الذي يُرَى في أغلب نوى المجرَّات النَّشِطة.

كل المجرَّات الضخمة تمر على الأرجح بمرحلةٍ من هذا النشاط، ثم تستقر في هدوء — شأن مجرَّة درب التبانة — حين يُبتلَع كلُّ «الوقود» الموجود قرب الثقب الأسود المركزي. لكن من الممكن أن تعاود نشاطها مجدَّدًا إذا حدث أن تسبَّبَ اقترابُها من مجرَّةٍ أخرى في إحداث ما يكفي من النشاط بحيث يتوافر مخزون جديد من الغاز والغبار — بل والنجوم أيضًا — كي يندفع داخل الثقب الأسود. وأي نجوم تعاني من هذا المصير تتمزَّق إربًا بفعل القوى المدِّيَّة عائدةً إلى الجسيمات المكوِّنة لها قبل أن تُبتلَع بوقت طويل.

عادةً ما تشع الطاقة الصادرة عن المصدر المركزي في اتجاهَيْن على جانبَيْن متقابلين للمجرَّة، وهذا يرجع غالبًا إلى أن القرص المزوِّد من المادة الموجودة حول الثقب الأسود يمنع الطاقة من الإفلات على امتداد «خط الاستواء». ومن الممكن أن يُطلَق كلٌّ من المادة والطاقة من المنطقة المركزية للمجرَّة نتيجةً لذلك، وهو ما يكوِّن أحيانًا تياراتٍ رفيعة تتفاعل مع المنطقة المحيطة، بحيث تطلق دفقات من الضوضاء الراديوية على كلا جانبَي المجرَّة. إن أكثر نوى المجرَّات النَّشِطة نشاطًا، تلك الفئة المعروفة بالنجوم الزائفة (أو الكويزرات)، الشديدة السطوع لدرجة أنه يكون من الصعب للغاية — وأحيانًا من المستحيل — رؤية النجوم الموجودة في المجرَّة المحيطة بسبب وهجها؛ ونتيجة لهذا فهي تبدو كالنجوم في الصور الفوتوغرافية العادية، ولا تتكشف طبيعتها الحقيقية إلا من خلال قياس إزاحاتها الحمراء. وهي في المعتاد تشع من الطاقة أكثر من ١٠ آلاف مرة من المقدار الذي تشعه كل نجوم مجرَّة درب التبانة مجتمعةً، ومن الممكن رؤية بعضٍ من هذه النجوم — حتى باستخدام تليسكوبات بصرية موجودة على سطح الأرض — على مسافات تزيد عن ١٣ مليار سنة ضوئية، بإزاحات حمراء تزيد عن ٦، والكثير منها له إزاحة حمراء تزيد عن ٤، وهو ما يكافئ مسافة قدرها نحو ١٠ مليارات سنة ضوئية. لكن النجوم الزائفة ساطعةٌ على نحو استثنائي، وليس من الضروري أن تكون مطابقة لما يحيط بها، ولحسن الحظ أن عددًا كبيرًا من أجرام بعيدة أشدَّ خفوتًا بكثيرٍ — مجرَّات هادئة نسبيًّا أقرب في الزمن إلى الانفجار العظيم — رُصِدت باستخدام تليسكوب هابل الفضائي، وقد دُفِع نحو أقصى حدود قدراته.

تكمن أهمية دراسة الأجرام الموجودة على مسافات عظيمة عبر الكون في أننا حين ننظر إلى جرم يقع — مثلًا — على مسافة ١٠ مليارات سنة ضوئية، فإننا نراه بواسطة الضوء الذي صدر عنه منذ عشرة مليارات عام مضت؛ فهذا هو «الزمن المنقضي»، وهو

يعني أن التليسكوبات هي أشبه على نحوٍ ما بآلات الزمن؛ من حيث إنها تُظهِر لنا ما كان عليه الكون في وقت سابق. إن الضوءَ القادم من أي مجرَّة قرصية قديمٌ؛ بمعنى أنه قضى وقتًا طويلًا في رحلته إلينا؛ بَيْدَ أن المجرَّة التي نراها باستخدام ذلك الضوء مجرَّةٌ شابَّة، وقد بيَّنت الدراسات المبكرة للنجوم الزائفة أنها كانت أكثر شيوعًا حين كان الكون أصغر عمرًا، وهو ما لنا أن نتوقَّعه إذا كانت تحصل على طاقتها بواسطة التراكم وتخبو حين تبتلع كل المادة المتاحة. تاريخيًّا، كان هذا أحدَ الأدلة التي رجَّحَتْ كفةَ الميزان لصالح نموذج الانفجار العظيم على فكرة الحالة الثابتة. لكن أعمق المشاهدات التي أُجرِيت بواسطة تليسكوب هابل الفضائي، والتي تكافئ زمنًا منقضيًا مقداره أكثر من ١٣ مليار عام، تخبرنا بما هو أكثر من ذلك بكثير.

ثمة أمرٌ عجيب آخَر بشأن كل هذا يجب ذكره؛ ففي حالة الأجرام البعيدة، نظرًا لأن الضوء يكون قد استغرق وقتًا طويلًا في رحلته إلينا، فإن الكون يكون قد تمدَّدَ بمقدار كبير خلال الفترة التي كان الضوء فيها في طريقه إلينا؛ لذا مع أن الزمن المنقضي البالغ مثلًا ٤٫٢٥ أعوام يعني ضمنًا أننا ننظر إلى جرمٍ يقع على مسافة ٤٫٢٥ سنوات ضوئية منَّا، فإن الزمن المنقضي البالغ ٤٫٢٥ مليارات عام يعني ضمنًا أننا ننظر إلى جرم كان على مسافة ٤٫٢٥ مليارات سنة ضوئية حين بدأ الضوء رحلته، لكنه الآن على مسافة أبعد من هذا بكثير، وفي هذه الحالة تزيد المسافة بأكثر من الضعف (بل الأمر أكثر تعقيدًا من هذا؛ نظرًا لأن المسافة التي على الضوء أن يقطعها تبدأ في الازدياد ما إن يبدأ الضوء رحلته، لكن هذا التبسيط المفرط سيكفي لتوضيح النقطة المنشودة). وهذا يثير مشكلات تتعلَّق بالتحديد الدقيق لما نعنيه بمصطلح «المسافة الحالية» بيننا وبين مجرَّة بعيدة؛ خاصة أنه بما أن لا شيء يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء فما من وسيلة لدينا لقياس «المسافة الحالية». لذا، كشأن الفلكيين الآخَرين، سأستخدم الزمن المنقضي بوصفه المؤشر الرئيس لمقدار المسافة بيننا وبين أي جرم، دون محاولة تحويل هذا الرقم إلى مسافة لأي جرم يقع خارج منطقتنا المحلية من الكون. و«المسافات» المشار إليها في مواضع سابقة من هذا الكتاب ينبغي في الواقع اعتبارُها مكافِئةً للأزمنة المنقضية.

من بين المزايا العديدة التي تتسم بها معدات التسجيل الفوتوغرافية والإلكترونية مقارَنةً بالعين البشرية، فإن أهمها هو أنه كلما نظرتْ هذه المعداتُ زاد مقدار ما تراه. العين البشرية تمنحنا بالأساس نظرةً حاليَّة لما يحيط بنا، وهي تمكِّننا من رؤية الأشياء — كالنجوم — التي تكون أشد سطوعًا من حدٍّ معين. وإذا كان الجسم خافتًا إلى درجة



شكل ٦-٥: صورة حقل هابل الفائق العمق.

تتعذَّر معها رؤيته، فما إن تتكيَّف العينُ مع الظلام فلن تتمكَّن من رؤيته مهما حدَّقَت في اتجاهه، إلا أن الكواشف الموجودة في التليسكوبات الحديثة تواصِل مراكَمةَ الضوء القادم من المصادر الخافتة ما دامت موجَّهةً نحوها. وسيكشف زمنُ التعريض الطويل عن الأجسام الخافتة بأكثر ما يفعل زمن التعريض القصير؛ لأن الفوتونات (جسيمات الضوء) القادمة من المصدر تسقط على الكاشف واحدًا تلو الآخَر؛ ومن ثَمَّ تنمو الصورة الإجمالية تدريجيًّا. وفي أقوى الأمثلة على تطبيق هذه العملية إلى الآن، وجَّهَ الفلكيون في الفترة بين ٢٤ سبتمبر ٢٠٠٣ و١٦ يناير ٢٠٠٤ تليسكوب هابل الفضائي لما مجمله مليون ثانية نحو بقعة صغيرة من السماء في كوكبة الكور، وكانت البقعة تبدو كأنها خالية تمامًا من المجرَّات في الصور الفوتوغرافية العادية. جرت عملية جمع الصور الإلكترونية في ٨٠٠ عملية تعريض منفصلة، ثم خُزِّنَت الصور إلكترونيًّا وجُمِّعت في جهاز كمبيوتر؛ كي تمنحنا ما يكافئ تعريضًا واحدًا طويلًا مقداره الزمني أكثر من

أحد عشر يومًا، وقد بيَّنَت الصورة الناتجة أن هذه البقعة من السماء التي تبدو خالية تمامًا هي في الواقع تعجُّ بالمجرَّات، بعضها يُرَى بواسطة ضوء غادرها حين كان الكون أقل عمرًا من ٨٠٠ مليون عام، بإزاحة حمراء مقدارها نحو ٧.

تُعرَف هذه الصورة باسم «حقل هابل فائق العمق»، وبقعة السماء الظاهرة في الصورة تكافئ جزءًا على ثلاثة عشر مليون جزء من مساحة السماء كلها؛ أي لا تزيد عن حجم حبة رمل محمولة على طول ذراعك، وقد وُصِفت من جانب الفلكيين القائمين على التقاط الصورة بأنها تعادل النظر للسماء عبر ماصة طولها متران ونصف متر. ومع ذلك فهذه البقعة الصغيرة من السماء تحتوي على نحو ١٠ آلاف مجرَّة مرئية في صورة حقل هابل فائق العمق، والمجرَّات الأكثر إثارةً للاهتمام هنا هي تلك الأشد خفوتًا واحمرارًا، التي لها أكبر زمن منقضٍ. والضوء الصادر عن هذه المجرَّات بعينها تسلَّلَ ببطء بالغ إلى الكاشف الموجود بتليسكوب هابل الفضائي بمعدل يبلغ فوتونًا واحدًا في الدقيقة.

مع احتواء صورة حقل هابل فائق العمق على العديد من المجرَّات الطبيعية، بما فيها مجرَّات بيضاوية وأخرى حلزونية، فإن هذه المجرَّات الأبعد لها تشكيلة متنوعة من الأشكال العجيبة، وبعضها منخرط دون شك في تفاعلات مع البعض الآخَر. بعض المجرَّات تبدو مرتَّبة على نحو أشبه بالحلقات على سوارِ معصمٍ، بينما البعض الآخَر طويل ورفيع مثل خلَّة الأسنان، وهناك مجموعة متنوعة من الأشكال الغريبة الأخرى. في تلك الأوقات المبكرة من تاريخ الكون، لم تكن هناك مجرَّات بيضاوية أو حلزونية؛ فلا شيء يشبه نوعية المجرَّات الموجودة بالقرب منَّا. ويفسِّر الفلكيون هذا على أنه دليل على أنهم التقطوا صورة خاطفة للمراحل المبكرة من تكوُّن المجرَّات، قبل أن تستقرَّ المجرَّات في الأنواع ذات البنية المنتظمة التي نراها في الكون في الأزمنة الأقرب. ويتوقَّع الفلكيون أنهم حين يتمكَّنون من النظر لمسافةٍ أبعدَ في الماضي بفضل الجيل القادم من التليسكوبات، فإنهم لن يروا شيئًا على الإطلاق؛ إذ سينظرون وقتها للفترة التي تُسمَّى «العصر المظلم» الواقعة بين الزمن الذي انفصل فيه الإشعاع عن المادة بعد مُضي بضع مئات آلاف الأعوام على الانفجار العظيم، والزمن الذي تكوَّنت فيه أولى المجرَّات بعد مُضي بضع مئات ملايين الأعوام على الانفجار العظيم، وفي هذه الحالة سيكون عدم رصد أي شيء بمنزلة تأكيد ناجح لنظرية علمية. وقد تكون أقدم الأجرام الظاهرة في صورة حقل هابل فائق العمق نفسها واقعةً على تخوم العصر المظلم، نحو ٤٠٠ مليون عام على الانفجار العظيم، بإزاحة حمراء قدرها ١٢.

وأروع شيء بشأن هذه المجرَّات — أو ربما حريٌّ بنا أن نسمِّيَها المجرَّات الأولية — هو أنها وُجِدت من الأساس في هذا الوقت المبكر من عمر الكون. ففي غضون أقل من مليار عام، تحوَّلَ الكون من بحر من الغاز الحار إلى مكان وجدت فيه بالفعل تكتلات المادة الكبيرة بما يكفي بحيث تُكَوِّن المجرَّات التي نراها في وقتنا الحالي، بحيث أحكمت هذه المجرَّات — بفعل الجاذبية — قبضتها على المادة التي لولاها لكانت قد انتشرت على نحوٍ رقيقٍ مع تمدُّد الكون. وما كان هذا ليحدث لو لم يكن هناك نوع من البذور تنمو منه المجرَّات؛ قلوب ذات تأثير جذبي قوي بما يكفي للتغلُّب على ترقُّق المادة عبر الكون. وقد كان إثبات أن هذه القلوب هي الثقوب السوداء الفائقة الضخامة هو الحلقة الأخيرة في نموذجٍ لتكوُّن المجرَّات من شأنه أن يفسِّر الكيفية التي صارت بها المجرَّات، كمجرَّة درب التبانة، على ما هي عليه، ويفسر في نهاية المطاف — بما أننا جزءٌ لا يتجزَّأ من مجرَّة درب التبانة — السبب وراء وجودها هنا من الأساس.

الفصل السابع

أصل المجرَّات

قبل أن ننظر بالتفصيل إلى تفسير الكيفية التي صارت بها المجرَّات على ما هي عليه، من المنطقي أن نبدأ ببيانٍ ما يبدو عليه الكون في وقتنا الحاضر؛ وذلك حتى تكون لدينا فكرةٌ واضحة عمَّا نحاول تفسيره. وصفتُ بالفعل طبيعة المجرَّات المنفردة ومظهرها، وذكرتُ حقيقةَ أن أغلب المجرَّات توجد في عناقيد مجرِّيَّة تُبقِي الجاذبية على تماسكها؛ بَيْدَ أن هناك طبقةً أخرى من البنية داخل الكون، وهي تقدِّم خيوطًا مهمة بشأن أصل المجرَّات؛ فعلى أكبر نطاقات الحجم، تصطفُّ المجرَّات (وتحديدًا، مجموعات المجرَّات والعناقيد الصغيرة) في خيوطٍ تتقاطع عبر الكون، ويقابِل بعضها بعضًا في تقاطعاتٍ توجد فيها عناقيد ضخمة من المجرَّات، وبين هذه الخيوط هناك مناطق أكثر إظلامًا يندر فيها وجود المجرَّات. عادةً ما يُشبَّه الأمر بصورة ملتقطة من الفضاء لمساحة كبيرة من العالم المتقدم، كأوروبا أو أمريكا الشمالية، أثناء الليل. فالطرق التي تقطع البلاد مضاءةٌ بواسطة مصابيح الطرق وبواسطة أضواء السيارات المارة، وهي تتقابل عند المدن ذات الإضاءة الساطعة، أما بين هذه الطرق فهناك المناطق الريفية المظلمة. الفارق الأساسي هو أن توزيع المجرَّات في الكون ثلاثيُّ الأبعاد، وهو ما يشكِّل بنيةً أشبهَ بالزَّبَد كما تُرَى من الأرض، وهو ما ظهر في أحدث عمليات مسح الإزاحة الحمراء للمناطق المجاورة من الكون، حتى إزاحة قدرها نحو ٠٫٥. وعلى العكس من العناقيد المجرِّيَّة والعناقيد المجرِّيَّة الفائقة، فهذه الخيوط ليست مرتبطةً بفعل الجاذبية، وإذا واصلنا تشبيهها بالطرق فسنقول إنها مجرد خطوط سير تتحرك على امتدادها المجرَّات بينما تمسك كتلُ المادة بعضها ببعض. بَيْدَ أن وجودها يكشف بالفعل عن مقدار المادة المشارك في عملية التماسك هذه.

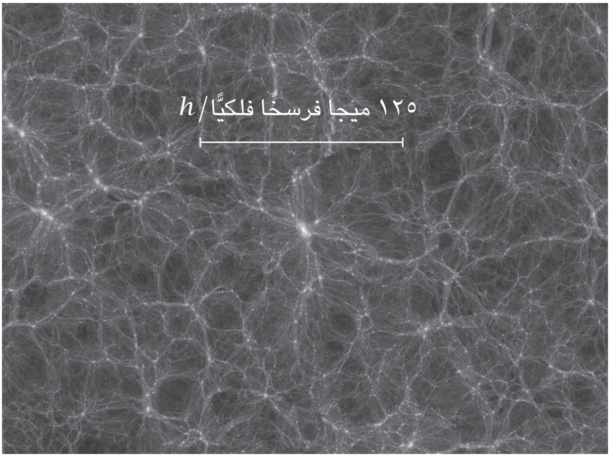
لقد خضع النمط الإجمالي لتوزيع المجرَّات في الأبعاد الثلاثة للدراسة بقدرٍ كبير من التفصيل على يد فِرَقٍ من الفلكيين الذين يضعون خرائط لتوزيع ملايين المجرَّات في السماء، مستخدمين الإزاحات الحمراء في تحديد المسافات إليها. وهذه المشاهدات للمناطق الكونية القريبة نسبيًّا يمكن مقارنتها بنمط البقع الحارة والباردة التي تُرَى في إشعاع الخلفية الميكروني — والمطبوعة على إزاحات حمراء مقدارها ١٠٠٠ — وأيضًا مقارنتها بالمحاكاة الحاسوبية للكيفية التي يمكن أن تنمو بها المجرَّات في عددٍ متنوِّع من النماذج المختلفة للكون. يقضي الفهم النظري للطريقة التي بدأ بها الكون في التمدُّد بأنه خلال مرحلة الكرة النارية، حين كانت المادة الباريونية والإشعاع مرتبطَيْن معًا عن كثب، كان الفضاء تغطِّيه على نحوٍ متقاطع موجاتٌ صوتية على كل الأطوال الموجية وصولًا إلى الحجم المحدود، المذكور سابقًا، الذي تمليه سرعة الضوء. وبعد الانفصال — كما رأينا — ظلَّ الإشعاع يحمل بصمةً للنمط الذي صنعته الموجات الصوتية، بينما استقرت المادة الباريونية في كتل من المادة تُبقِي الجاذبية على تماسكها. وعن طريق تطبيق الأساليب الإحصائية في تحليل أنماط المجرَّات التي نراها في الكون من حولنا، صار الفلكيون الآن قادرين على رصد توقيع هذه الموجات الصوتية (التي يُطلَق عليها «القمم الصوتية») في توزيع المادة نفسها.

في عام ٢٠٠٥ أفاد فريقان يستخدمان تحليلات مختلفة بأن التفاوتات الإحصائية في توزيع المجرَّات، والتي تُرَى في عمليات المسح الكبيرة الثلاثية الأبعاد، تُظهِر بصمةَ هذه الموجات الصوتية الآتية من الانفجار العظيم. على صعيد المشاهدات، كل شيء يتوافق على نحو أنيق؛ بَيْدَ أن عمليات المحاكاة الحاسوبية تخبرنا أنه من المستحيل لبِنًى ذات حجم كبير كتلك التي نراها في الكون اليوم أن تنمو من التموُّجات الحاضرة في الكرة النارية للانفجار العظيم في الوقت المتاح منذ حدوث الانفجار العظيم، إذا كان الشيء الوحيد الذي يجتذب الباريونات للتجمُّع في كتلٍ هو جاذبيتها الخاصة فحسب. خلاصة الأمر هي أنه مع أن الموجات الصوتية ربما كانت كبيرة من حيث امتلاكها لطول موجي كبير، فإنها كانت كذلك ضحلة، لا تتجاوز محض تموجات في البحر الكوني.

لا ينبغي أن تفاجئنا الحاجةُ إلى قدر إضافي من التأثير الجذبي؛ نظرًا لأنني ناقشت بالفعل الأدلة على وجود المادة المظلمة من الطريقة التي تدور بها المجرَّات المنفردة، وحقيقة أن العناقيد المجرِّيَّة متماسكة بفعل قوة الجاذبية. لكن هذا دليل مختلف تمامًا على وجود المادة المظلمة، وعمليات المحاكاة الحاسوبية دقيقة للغاية لدرجة أنها يمكنها أن تخبرنا على نحوٍ دقيقٍ بمقدار المادة المظلمة المطلوب لإحداث التأثير المنشود.

عمليات المحاكاة هذه تتبع سلوك «الجسيمات» المنفردة التي تتحرك تحت تأثير الجاذبية في نموذجٍ للكون المتمدد. كل جسيم من هذه الجسيمات يكافئ كتلةً مقدارها مليار مرة قدر كتلة الشمس، وتتضمن أكبر عمليات المحاكاة إلى الآن عشرة مليارات جسيم، تتحرك بما يتوافق وقوانين الفيزياء المعروفة. تبدأ المحاكاة بترتيب الجسيمات إحصائيًّا بالطريقة عينها التي نعرف أن المادة كانت موزَّعةً بها عند وقت الانفصال عن الإشعاع، ثم تمضي قُدمًا في سلسلة من الخطوات التي تأخذ في الاعتبار الكيفية التي يتمدَّد بها الكون. يمكن اختيارُ عمليات المحاكاة بحيث تتضمن تأثيراتِ أنواعٍ مختلفة من الثوابت الكونية، ومقاديرَ مختلفة من المادة المظلمة، وقِيَمًا مختلفة لانحناء الزمكان. تستغرق هذه العمليةُ الكثيرَ من وقت الحاسب، وقد تطلَّبَ الحصولُ على المحاكاة المبيَّنَة في الشكل رقم ٧-١ عملَ مجموعةٍ من حاسبات يونيكس التي تستخدم ٨١٢ معالجًا واثنين تيرا بايت من الذاكرة، وتؤدي ٤٫٢ تريليونات عملية حسابية في الثانية، وذلك لمدة أسابيع عديدة. وإجمالًا، أنتجت المحاكاةُ سلسلةً من ٦٤ لقطة للنموذج الكوني في مراحل مختلفة، بما يتوافق مع أزمنة مختلفة منذ الانفجار العظيم، وتصل إلى ذروتها في الوقت الحاضر.

والنتائج واضحة؛ فإحصائيًّا، تبدو المحاكاة تمامًا مثل الكون الحقيقي؛ ولهذا السبب وقع اختياري عليها. وهي تمثِّل الفئة الوحيدة من هذه النماذج التي تبدو على هذا الشكل. وانطلاقًا من نوعية نمط عدم الانتظام الذي يُرَى في إشعاع الخلفية الميكروني، فإن نوعية توزيع المجرَّات التي نراها في الكون اليوم لا يمكن أن تنتج في ١٣ مليار عام إلا إذا كان الكون منبسطًا، وكان مقدار المادة المظلمة أكبر بستِّ مرات من المادة الباريونية، وكان الثابت الكوني يسهم بنحو ٧٣ بالمائة في كثافة كتلة الكون. وهذا، بطبيعة الحال، هو نموذجُ المادةِ والطاقة المظلمة الفائقُ النجاح. والسر وراء تكوين البنية المرصودة هو أنه ما إن تنفصل المادة الباريونية عن الإشعاع وتكون حرةً في الحركة كما تشاء، فإنه في مناطق الكون المبكر التي تتسم بالفعل بكثافة أعلى بدرجة طفيفة من المادة المظلمة، جذبت هذه المادة الغازَ الباريوني إلى ما يشبه الأخاديد الجذبية، حيث صارت سُحُب الغاز كثيفةً بما يكفي لأن تنهار وتكوِّن المجرَّات والنجوم، الموزَّعة في نمط رغوي عبر الكون. ففي الفراغات المظلمة الواقعة بين الخيوط الساطعة لا تزال توجد تقريبًا نفس كثافة الباريونات والمادة المظلمة الباردة، وكل ما تطلَّبه الأمر هو تموُّج صغير (بمعنى ضحل) هنا وهناك كي تتشكَّل الظروف المطلوبة لجعل سُحُب



شكل ٧-١: المحاكاة الخاصة بتوزيع المادة في الكون المتمدد الموصوف في النص. هذا يتوافق إلى حدٍّ بعيد مع التوزيع المرصود للمجرَّات.

الغاز تنهار. وهنا يمكن تغيير التشبيه المذكور سابقًا والخاص بشبكة الطرق، ونقول إن الخيوط الساطعة يمكن النظر إليها بوصفها أنهارًا تتدفق على امتدادها الباريونات. هذا هو الهيكل الأساسي الذي في إطاره يؤمن الفلكيون الآن بأنهم يملكون فهمًا جيدًا للكيفية التي تكوَّنت بها المجرَّات المنفردة.

بعد الانفصال مباشَرةً، كانت المادة الباريونية لا تزال حارَّة للغاية بما يمنعها من الانهيار بدرجة كبيرة، حتى في وجود المادة المظلمة. لكن الأمر المهم للغاية هو أن المادة المظلمة — نظرًا لأنها باردة — بدأت في الانهيار فورًا في المواضع التي كانت فيها الكثافة أعلى قليلًا من المتوسط. وحتى مُضي نحو ٢٠ مليون عام على الانفجار العظيم — وهو ما يتوافق مع إزاحة حمراء مقدارها نحو ١٠٠ — كان الكون متجانسًا إلى حدٍّ بعيد، لكن جسيمات المادة المظلمة الباردة كانت تشرع في اجتذاب بعضها البعض مكوِّنة كتلًا متماسكةً بفعل الجاذبية، قادرةً على الإمساك بالمادة ومنعها من الانسياق للتمدُّد الكوني إلى الخارج. وانطلاقًا من نفس نوع التموجات الموجود في إشعاع الخلفية، كان بمقدور المادة المظلمة الباردة بإزاحة حمراء قدرها ما بين حوالي ٢٥ و٥٠ أن تشكِّل كتلًا تحتوي

على مقدارٍ من الكتلة يعادل كتلة كوكب الأرض، لكنها تمتد على مساحة كبيرة تعادل مساحة المجموعة الشمسية. وقد تركَّزَ السواد الأعظم من كتلة هذه السحب الكروية بالقرب من المركز، وكانت السحب التي تكوَّنت بهذه الطريقة تمتلك تأثيرًا جذبيًّا قويًّا بما يكفي لبعضها على بعض بحيث قاومت التمدد الكوني وكوَّنت عناقيد، وعناقيد من العناقيد، وهكذا دواليك في بنية هرمية «من الأسفل إلى الأعلى». وهذا جعل المادة الباريونية تنساب نحو أكبر تركيزات الكتلة، مكوِّنة النجوم وبعد ذلك المجرَّات عند نقاط التقاء الخيوط أثناء عمل ذلك، ومنتجة مظهر «الطريق السريع الكوني» الخيطي للكون.

أوائل الأجرام الساطعة التي ظهرت في الكون كانت النجوم الضخمة، التي تعادل كتلتُها ما بين بضعة عشرات إلى بضع مئات المرات قدر كتلة الشمس، وهذه النجوم تختلف للغاية عن النجوم الموجودة حولنا اليوم؛ لأنها كانت تحتوي فقط على الهيدروجين والهليوم المنتجَيْن في الانفجار العظيم، دون وجودٍ لأيٍّ من العناصر الثقيلة. كانت أولى منظومات تكوُّن النجوم جزءًا من بنية خيطية أكبر تمتد على نحو هرمي عبر الكون، ولا تزال آخِذة في التطور مع تدفُّق العناقيد المجرية والعناقيد المجرية الفائقة معًا في خيوط. ويقترح هذا النموذج أن مناطق تكوُّن النجوم ظهرت بعد نحو ٢٠٠ مليون عام على الانفجار العظيم، وأن كل منطقة منها احتوت من الكتلة على ما بين مائة ألف إلى مليون مرة قدر كتلة الشمس، وكان حجمها بين ٣٠ و١٠٠ سنة ضوئية، وهي مقارِبة في الحجم لسُحُب الغاز والغبار التي تتكوَّن في النجوم اليوم في مجرَّة درب التبانة؛ بَيْدَ أن هذه «السُّحُب» تكوَّنت بالأساس من المادة المظلمة.

تشير عمليات المحاكاة الخاصة بالطريقة التي يمكن للباريونات أن تتكتَّل بها كي تكوِّن النجوم في مثل هذه السحب إلى أن بنيةً خيطيةً، شبيهةً بالبنية الخيطية الأوسع نطاقًا، تطوَّرت داخل كل سحابة، مع تركُّز المادة عند نقاط التقاء الخيوط. ومع زيادة الكثافة، صارت التصادمات بين الذرات أكثر شيوعًا، وتجمَّعت بعض ذرات الهيدروجين معًا مكوِّنةً جزيئات هيدروجين، وهذه الجزيئات برَّدَتِ الغاز الموجود داخل السحابة عن طريق إطلاق الأشعة تحت الحمراء، كما تفعل جزيئاتُ الهليوم الأمرَ عينه وإن كان على نحوٍ أقل كفاءةً. وهذا التبريد وحده هو ما مكَّنَ الغاز الباريوني الموجود في السحابة من الانهيار بدرجةٍ أكبر مكوِّنًا النجوم الأولية، وهو ما فصل الباريونات بدرجةٍ ما عن المادة المظلمة.

في مناطق تكوُّن النجوم اليوم، تسير عملية التبريد على نحوٍ أكثر كفاءةً بكثير، وذلك بفضل وجود العناصر الثقيلة؛ ولهذا السبب تكون السُّحُب قادرةً على الانهيار بالمقدار

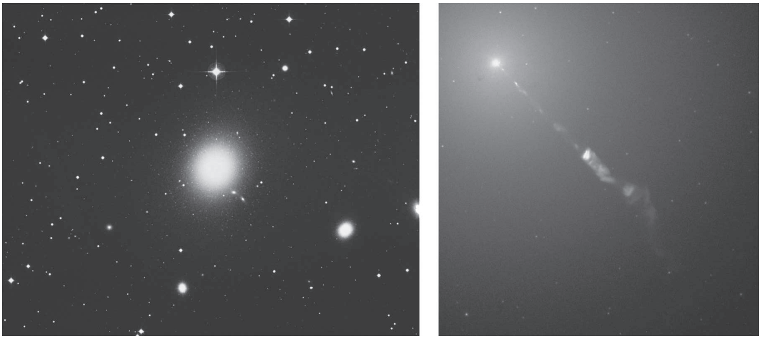
الذي تفعله قبل تكوُّنِ النجوم. لكن في سُحُب تكوُّن النجوم البدائية كان كلُّ شيء يحدث على درجة حرارة أعلى، ونتيجةُ ذلك أن أُولَى عُقَد تكوُّن النجوم في السحابة كانت كتلتها تتراوح بين بضع مئات وألف كتلة شمسية. وكما الحال في عملية تكوُّن النجوم اليوم، كان من الصعب للغاية لهذه السحب أن تتشظَّى، ولم يكن بمقدور أي سحابة سوى أن تكوِّن القليل من النجوم (ليس أكثر من ثلاثة نجوم على الأرجح)، مع الإطاحة ببعض الكتلة بعيدًا بسبب ازدياد حرارة النجوم الأولية.

كانت النتيجة تكوُّن أول مجموعة من النجوم (والتي سُمِّيت على نحوٍ محيِّر «نجوم التصنيف ٣» نتيجة التسمية التقليدية للنجوم في مجرتنا) تبلغ كتلتها في المعتاد بضع مئات المرات قدر كتلة الشمس، وتبلغ درجة حرارة سطحها نحو ١٠٠ ألف درجة كلفينية، وتطلق إشعاعًا قويًّا في نطاق الأشعة فوق البنفسجية من الطيف. وهذا الإشعاع، الذي ملأ الكون المبكر، لا يزال مرئيًّا اليوم، لكن نتيجة للإزاحة الحمراء هو يُرَى اليوم على صورة وهج من الأشعة تحت الحمراء رصده تليسكوب سبيتزر الفضائي.

مع أن أوائل النجوم كانت ساطعةً، فإنها كانت قصيرة الأجل. إن عمر النجم يتناسب عكسيًّا مع كتلته؛ لأن النجوم الضخمة يجب أن تحرق المزيد من الوقود كي تحافظ على تماسُكها ولا تنهار بفعل ثقل وزنها. وفي غضون بضعة ملايين الأعوام — لا نزال في غضون نحو ٢٠٠ إلى ٢٥٠ مليون عام من الانفجار العظيم — كانت النجوم التي بدأت حياتها بكتلٍ تتراوح تقريبًا بين ١٠٠ إلى ٢٥٠ مرة قدر كتلة الشمس قد انفجرت تمامًا مع نهاية حياتها، ناشرةً مادتها في أرجاء سحب الغاز المحيطة، وهذه المادة تضمَّنَتْ أوائل العناصر الثقيلة، التي جعلت عملية التبريد أكثر كفاءةً بكثير عند تكوُّن الجيل التالي من النجوم، وهو ما جعل تركيزات تكوُّن النجوم في المناطق التي دفعَتْها الموجاتُ الانفجارية — الآتية من النجوم المتفجرة — إلى الانهيار، تصير أصغر كثيرًا وتُكوِّن أوائل النجوم المقاربة في الحجم للنجوم الموجودة في مجرَّة درب التبانة اليوم. وفي الواقع، لا يزال بعضٌ من نجوم الجيل الثاني تلك حاضرًا في مجرتنا؛ إذ يُقدَّر أن أقدم «نجوم التصنيف ٢» يتجاوز عمره ١٣٫٢ مليار عام؛ ومن ثَمَّ فهي تكوَّنَتْ في غضون نحو ٥٠٠ مليون عام تقريبًا من الانفجار العظيم.

النجوم التي تزيد كتلتها بنحو ٢٥٠ مرة عن كتلة الشمس لا تتمزق بالكامل عند موتها، وبدلًا من هذا فإن أغلب المادة التي تحتوي عليها تنهار مكوِّنة ثقبًا أسود. هذه النجوم البدائية تكوَّنَتْ في أشد تركيزات المادة كثافةً في الكون في ذلك الوقت؛ لذا من

المرجح أن الثقوب السوداء كانت قريبةً بعضها من بعض بما يكفي كي يحدث اندماج بينها وأن تنمو الثقوب السوداء إلى أحجامٍ فائقةِ الضخامة. لا أحد يمكنه أن يعرف يقينًا من أين أتت الثقوب السوداء الفائقة الضخامة الموجودة اليوم في قلوب المجرَّات، لكن يبدو ممكنًا على الأقل أن هذا الاندماج للثقوب السوداء المتخلفة عن الجيل الأول من النجوم قد بدأ العملية التي تشكَّلت بموجبها الثقوب السوداء الفائقة الضخامة التي تتغذى على المادة المحيطة بها.



شكل ٧-٢: ثقب أسود نَشِط. التيار المندفع من مركز المجرَّة M87 يحركه ثقب أسود، ورغم ظهور التيار بالكاد للعيان في صورة فوتوغرافية ضوئية (إلى اليسار)، فإنه يظهر على نحو أكثر وضوحًا بكثير في الصورة الملتقطة بالأشعة تحت الحمراء (إلى اليمين).

تبيِّن مشاهدات النجوم الزائفة على إزاحات حمراء مقدارها نحو ٦٫٥ أن ثقوبًا سوداء تبلغ كتلتها مليار مرة قدر كتلة الشمس على الأقل قد تكوَّنت قبل أن يبلغ الكون من العمر مليار عام بوقت طويل. هذه الأمثلة كبيرة بدرجة استثنائية؛ ولهذا السبب تكون هذه النجوم الزائفة من السطوع بحيث يمكن رؤيتها على أزمنة منقضية قدرها ١٣ مليار سنة ضوئية، لكنها تؤكِّد السرعة التي ظهرت بها المجرَّات في الكون. وتُظهر عمليات المحاكاة أنه من المؤكد وجود العديد من الثقوب السوداء الأصغر وقتها بالمثل، وأنها شكَّلت قلوبًا نمَتْ منها المجرَّات، وأن كل ثقب أسود ربما يكون مطمورًا في هالة تحتوي من المادة على مقدار يساوي ألف مليار كتلة شمسية. كانت المادة الباريونية

تسقط داخل الثقب الأسود، محرِّرة طاقة الجاذبية لتزويد النجوم الزائفة وغيرها من نوى المجرَّات النَّشِطة بالطاقة، بينما تكوَّنت النجوم في المناطق الخارجية الأهدأ لِما صار لاحقًا مجرَّة عند استقرار المادة الباريونية؛ بَيْدَ أن المحاكاة تُظهِر أيضًا أن أعدادًا كبيرة للغاية من سحب الغاز المكونة من المادة المظلمة، والتي تساوي في كتلتها كتلةَ كوكب الأرض، ينبغي أن تكون قد اجتازت كلَّ هذا الحراك الصاخب وظلت باقيةً حتى وقتنا الحاضر، وأنها حاضرة في هالات المادة المظلمة الموجودة حول المجرَّات. ويُقدَّر أنه قد يوجد ألف تريليون (١٠^١٥) من هذه الأجرام في الهالة المحيطة بمجرَّة درب التبانة وحدها.

وتبيِّن الحسابات أن العملية التي وصفتُها يمكنها أن تكوِّن مجرَّةً بحجم مجرَّة درب التبانة في الوقت المتاح — بضعة مليارات عام — بشرط أن تكون للثقب الأسود المركزي كتلةٌ لا تقل عن مليون كتلة شمسية. ولحسن الحظ تكشف المشاهدات عن أن كتلة الثقب الأسود الموجود في قلب مجرَّة درب التبانة تزيد عن كتلة الشمس بنحو ثلاثة ملايين مرة؛ ومن ثَمَّ كل شيء يتوافق جيدًا. لكن مع أن الفلكيين يملكون نموذجًا متسقًا داخليًّا للكيفية التي تكوَّنت بها المجرَّات الأولى، لا يزال هناك الكثير من الأمور التي تحتاج لتفسير؛ منها تلك العلاقة المثيرة للاهتمام بين كتلة الثقب الأسود القابع في قلب المجرَّة وخصائص المجرَّة المحيطة به.

من المفيد أن نتذكَّر أن الدراسة الخاصة بالثقوب السوداء الفائقة الضخامة حديثةٌ نسبيًّا، فلا يمكن دراسة الثقوب السوداء على نحوٍ مباشِرٍ إلا في المجرَّات القريبة، حيث يُكشَف عن وجود جرم ضخم مركزي من خلال قياس سرعات النجوم التي تدور بالقرب منه؛ وذلك باستخدام تأثير دوبلر. جرى تحديد أول ثقب أسود فائق الضخامة في عام ١٩٨٤، ومنذ ذلك الوقت وحتى نهاية القرن العشرين كان مجرد العثور على ثقب أسود يمثِّل حدثًا مهمًّا؛ فالعدد المعروف منها لا يكفي مطلقًا لعمل أي تعميمات بشأن خصائصها. لكن بحلول عام ٢٠٠٠، ارتفع عدد الثقوب السوداء الفائقة الضخامة إلى ٣٣، ويتم العثور على واحد أو اثنين كلَّ عام. هذا يكفينا للبدء في محاولة فهم العلاقة بين هذه الأجرام وبين المجرَّات التي تحويها.

في بداية القرن الحادي والعشرين، اكتشف الفلكيون علاقةً بين كتلة الثقب الأسود المركزي في المجرَّة وبين كتلة انتفاخ النجوم الموجود في مركز القرص، أو كتلة المجرَّة كلها في حالة المجرَّات البيضاوية. لا توجد علاقة ارتباط مع خصائص القرص نفسه؛

فالأقراص تبدو كأنها إضافة ثانوية تَلَتْ تطوُّرَ الانتفاخ. وبما أن الانتفاخ الموجود في مركز المجرَّة القرصية يشبه عن كثب مجرَّةً بيضاوية، يبدو من المرجح أن كل المجرَّات البيضاوية البدائية نمَتْ حول ثقوب سوداء بالطريقة عينها، لكن لم تُطوِّر جميعها أقراصًا، ربما بسبب نقص المواد الخام التي يمكن أن يتكوَّن القرص منها؛ لذا عند الإشارة إلى الخصائص العامة للمجرَّات البيضاوية والانتفاخات الموجودة في المجرَّات القرصية، يستخدم الفلكيون مصطلحَ: «السطح الكروي».

تتحدَّد كتل الثقوب السوداء الفائقة الضخامة عن طريق قياس سرعات النجوم القريبة للغاية من مركز السطح الكروي. ويمكن تقدير كتلة السطح الكروي من واقع سطوعه، لكن من الممكن أيضًا حساب السرعة المتوسطة للنجوم في السطح الكروي كله من خلال أخذ متوسط تأثير دوبلر للمنظومة الكبرى، وهو ما يقدِّم مقياسًا لما يُطلَق عليه: «تشتُّت السرعة». وهذا مقياس منفصل تمامًا، ويمكن استخدامه للكشف عن كتلة السطح الكروي بالطريقة عينها التي تكشف بها حركةُ المجرَّات داخل العنقود المجرِّي عن كتلة العنقود ككلٍّ. وبجمع هذه العناصر معًا يتبيَّن أن الثقوب السوداء الأكثر ضخامةً توجد في الأسطح الكروية الأكبر حجمًا. ليس هذا مدعاة للدهشة في حقيقة الأمر، لكن المفاجأة هي أن علاقة الارتباط بين الاثنين دقيقة للغاية؛ فالثقب الأسود المركزي دائمًا ما تساوي كتلته ٠٫٢ بالمائة من كتلة السطح الكروي.

هذه نسبة ضئيلة للغاية من الكتلة الكلية للسطح الكروي، لدرجة أنها توضِّح بجلاء أن الثقب الأسود نفسه ليس مسئولًا عن مقدار السرعة الذي تتحرك به النجوم الموجودة في السطح الكروي؛ إذ إن كل ما «تلاحظه» هذه الثقوب — من منظور الجاذبية — هو كتلتها الإجمالية (بمعنى الكتلة المجمعة للنجوم، وأي سحب باقية من الغاز والغبار موجودة بين النجوم)؛ ومن ثَمَّ فالسطح الكروي لا يدري فعليًّا أن هناك ثقبًا أسود موجودًا به؛ وإذا أُزيل هذا الثقب منه، فسيظل السطح الكروي على حاله دون تغيير؛ سواء من حيث المظهر أو السلوك.

مع أن علاقة الارتباط يُعبَّر عنها على أبسط صورة من منظور الكتلة، فإن الجانب الأكثر أهمية هو أن نجوم السطح الكروي الموجودة حول الثقب الأسود الفائق الضخامة تتحرك على نحو أسرع، وهذا إشارة إلى أن سُحُب المادة الباريونية التي تكوَّنت منها النجومُ انهارت بوتيرة أكبر داخل هالة المادة المظلمة الخاصة بها خلال عملية تكوُّن المجرَّة. بعبارة أخرى: الثقوب السوداء نَمَتْ في المنظومات التي شهدت حالاتِ انهيارٍ

أكثر، وهو ما يشير إلى أن الانهيار يغذِّي الثقب الأسود أثناء نموه. تتحدَّد كتلة الثقوب السوداء بفعل عملية الانهيار، ويبدو من غير المرجح بشدة أن الثقوب السوداء الفائقة الضخامة قد تكوَّنت أولًا، ثم نمت المجرَّات حولها؛ إذ من المؤكد أن الاثنتين نمَتَا معًا — في عملية يشار لها أحيانًا باسم التطور المشترك — من البذور التي وفَّرتها الثقوب السوداء الأصلية التي تبلغ كتلتها بضع مئات المرات قدر كتلة الشمس، ومن المواد الخام الموجودة في سُحُب الباريونات الكثيفة في العقد الموجودة في البنية الخيطية.

لا تزال تفاصيل الكيفية التي حدث بها هذا التطور التكافلي المشترك غير معروفة، لكن من السهل أن نرى بشكل عام كيف أن الطاقة المتدفقة من أي ثقب أسود أولًا ستؤثِّر على الطريقة التي تتكوَّن بها النجوم في المادة المحيطة، ثم ستوقف نمو الثقب الأسود ونشاطه في نقطة حرجة عن طريق دفع سُحُب الغاز والغبار المحيطة بعيدًا، وفي الوقت ذاته توقف المرحلة المبكرة السريعة لتكوُّن النجوم. هذا يتوافق مع المشاهدات الخاصة بمجرَّات الانفجار النجمي التي فيها تُرَى رياحٌ تحمل من المادة ما يعادل ألف كتلة شمسية وهي تتدفق خارجةً من المناطق المركزية، وهذه الرياح — أثناء عملها — ستنشِّط عمليةَ تكوُّن النجوم في السُّحُب الكثيفة الموجودة بين النجوم، والتي تضغطها بينما تهب عليها. وبينما يبتلع الثقب الأسود ٠٫٢ بالمائة فقط من الكتلة المتاحة، فإن نحو ١٠ بالمائة من المادة الباريونية يتحوَّل إلى نجوم.

هذه العلاقة بين الثقب الأسود المركزي وتشتُّت السرعة تنطبق على نطاقٍ من الثقوب السوداء ذات الكتل التي تتراوح بين بضعة ملايين وبضعة مليارات مرة قدر كتلة الشمس؛ أي عبر معامل قدره ألف (ثلاث قيم أسِّيَّة)، وهي أيضًا تنطبق على امتداد الكون بدايةً من الوقت الحاضر وحتى إزاحات حمراء لا تقل عن ٣٫٣، حين كان الكون يبلغ من العمر مليارَيْ عام فقط. حين اكتُشِفت هذه العلاقة للمرة الأولى، بَدَا أن المجرَّات القرصية المسطحة التي ليس بها انتفاخ مركزي لا تملك ثقوبًا سوداء مركزية أيضًا، لكن في عام ٢٠٠٣ اكتشف الفلكيون ثقبًا أسود ذا كتلة تتراوح بين ١٠ آلاف و١٠٠ ألف مرة قدر كتلة الشمس في المجرَّة القرصية NGC 4395 التي ليس بها انتفاخ مركزي. يُعَدُّ حجم هذا الثقب ضخمًا للغاية مقارَنةً بالشمس، لكنه لا يتجاوز وزنَ بعوضة مقارَنةً بنوعية الأجرام التي استعرضتُها إلى الآن. لكن مع أن هذه المجرَّة ليس بها انتفاخ مركزي، فإن هناك تركيزًا مركزيًّا من النجوم ذا تشتُّتِ سرعةٍ يشير إلى وجود كتلة ثقب أسود مقدارها نحو ٦٦ ألف مرة قدر كتلة الشمس. بعبارة أخرى: تشتُّت السرعة والكتلة يوافق العلاقة

الموجودة في المنظومات الأكبر بكثير. ومن المحتمل أن كل المجرَّات القرصية والبيضاوية تأوي ثقوبًا سوداء مركزية، أما المجرَّات غير المنتظمة فليست لها ثقوب سوداء مركزية.

تنطبق هذه العلاقة أيضًا على مجرَّتنا؛ مجرَّة درب التبانة، وعلى أقرب جاراتها، المجرَّة M31؛ مجرَّة أندروميدا. فالثقب الأسود الموجود في قلب مجرَّة درب التبانة له كتلة مقدارها ثلاثة ملايين كتلة شمسية فقط، ويوجد بالمجرَّة انتفاخ مركزي صغير، أما الثقب الأسود الموجود في قلب مجرَّة أندروميدا فتبلغ كتلته ٣٠ مليون مرة قدر كتلة الشمس، ويوجد بالتبعية انتفاخ مركزي أكبر بها. والعلاقة الإجمالية بين مجرَّة درب التبانة ومجرَّة أندروميدا تمنحنا أيضًا دلائل على ما حدث للمجرَّات بعد أن تكوَّنَتْ رفقة ثقوبها السوداء المركزية في الحقبة المبكرة من عمر الكون.

العمليات التي وصفتُها إلى الآن تفسِّر أصلَ المجرَّات البيضاوية والقرصية الأصغر حجمًا، لكن المجرَّات البيضاوية العملاقة يبدو أنها تكوَّنَتْ — كما سبق أن ألمحت — من خلال عمليات اندماج لمجرَّات صغيرة الحجم. في الوقت الحالي، تقترب مجرتا درب التبانة وأندروميدا كلٌّ منهما من الأخرى بسرعةٍ قدرها مئات الكيلومترات في الثانية. ليس مُقدَّرًا للمجرتين أن تتصادَمَا تصادُمًا مباشِرًا، لكن في غضون عشرة مليارات عام على الأكثر ستندمج المجرتان معًا مكوِّنتَيْن مجرَّةً بيضاوية واحدة عملاقة. وثمة أدلة على أن مجرَّة أندروميدا قد نَمَتْ إلى حجمها الحالي عن طريق ابتلاع مجرَّة أخرى كبيرة الحجم نسبيًّا؛ نظرًا لأنه يبدو أنها تمتلك قلبًا مزدوجًا، لكن الاندماج المتوقَّع بين المجرتين القرصيتين الناضجتين سيكون حدثًا أشد إثارةً بكثير.

كما ذكرت من قبلُ، تبعد النجوم بعضها عن بعض بمسافات كبيرة، نسبةً إلى أقطارها، لدرجة أنه حتى لو حدث أن تصادَمَتْ مجرتان تصادُمًا مباشِرًا، فثمة فرصٌ ضئيلة لأن تتصادم النجوم بعضها مع بعض. فالمجرَّات يمرُّ بعضها من خلال بعض، وتعمل الجاذبية على تشويه أشكال المجرَّات بينما تغيِّر من مدارات النجوم. تحدث تصادمات بالفعل بين سُحُب الغاز والغبار العملاقة الموجودة بين النجوم، وتنضغط هذه النجوم وتتشوَّه بفعل تأثيرات الجاذبية، مسبِّبة موجات تكوُّن النجوم التي نراها في العديد من مجرَّات الانفجار النجمي. والغاز والغبار المندفعان من كل مجرَّة بينما تمر عبر الأخرى سيصنعان تيارات من المادة قد تتكوَّن داخلها عناقيدُ كروية جديدة. بعد ذلك، تلتفُّ المجرتان كلٌّ منهما حول الأخرى وتمران بهذه التفاعلات من جديد. وتستمر العملية، مع اقتراب قلبَي المجرتين كلٍّ منهما من الآخر مع كل التفاف، إلى أن تندمج

المجرتان في منظومة واحدة لا يوجد بها قرص ظاهر، وإنما كتلة كاملة من النجوم التي تتحرك داخلها التيارات في اتجاهات متنوعة، بعضها يحمل ذكرى القرصين اللذين كانا موجودين فيما مضى. ويتسبَّب الاندماج النهائي للثقبين الأسودين المركزيين في إطلاق دفقة من الطاقة التي تطلق مرحلة أخيرة من نشاط الانفجار النجمي، ثم تستقر المجرَّة البيضاوية العملاقة الجديدة في حياة هادئة. ومن الممكن رؤية ما يحدث بعد الاندماج بالفعل في المجرَّة NGC 6240، التي يوجد بها ثقبان أسودان تفصل بينهما مسافة كيلو فرسخ فلكي واحد تقريبًا، ويقترب كلٌّ منهما من الآخر على مسارٍ تصادمي في قلب المجرَّة.

كان يُعتقَد سابقًا أنه في حالة مجرتَيْ درب التبانة وأندروميدا سيتراوح الإطار الزمني لحدوث كل هذا بين نحو خمسة مليارات عام وعشرة مليارات عام من الآن، بعد أن تكون حياةُ الشمس بوصفها نجمًا ساطعًا قد انتهت. لكن في عام ٢٠٠٧ قدَّمَ فريقٌ من مركز هارفرد سميثسونيان للفيزياء الفلكية حسابات أشارت إلى أن تشوُّهَ مجرَّة درب التبانة يمكن أن يبدأ في غضون مليارَيْ عام فقط، وهو الوقت الذي يمكن أن تكون فيه حياة ذكية باقية في مجموعتنا الشمسية بحيث تشهد هذا الحدث. لكن على أي مراقبٍ أن يتحلى بالصبر؛ لأنه حتى على أساس هذا الإطار الزمني المنقح سيستغرق الاندماج ثلاثة مليارات عام أخرى كي يكتمل، وبحلول ذلك الوقت، ستُزاح الشمس المسنَّة إلى مدارٍ يبعد ٣٠ كيلو فرسخًا فلكيًّا عن مركز المنظومة المندمجة، وهو ما يعادل نحو أربعة أضعاف المسافة التي تبعدها حاليًّا عن مركز مجرَّة درب التبانة. ومع أنه لم يتحدَّد بعدُ إن كان هذا الإطار الزمني المنقح مقبولًا، فإن النتيجة النهائية واحدة على أي حال، أيًّا كان وقت حدوثها.

يمكن أيضًا أن تتسبَّب المواجهات القريبة في انكماش المجرَّات؛ ففي العناقيد المجرية الثرية، تتحرك المجرَّات المنفردة («النحلات» الموجودة في «السرب») بسرعة كبيرة للغاية تحت تأثير الجاذبية، لدرجة أنها تعجز عن الاندماج وإنما تمرق مجتازة بعضها البعض في مواجهات خاطفة تجرِّدها من الغاز والغبار، بل ومن النجوم أيضًا، وترسل المادة متدفِّقة إلى الخارج نحو الفضاء الموجود بين المجرَّات، حيث تشكِّل ضبابًا حارًّا يمكن رصده عند الأطوال الموجية الخاصة بالأشعة السينية. وتستقر أكبر المجرَّات في مركز مثل هذه العناقيد، وكأنها أنثى عنكبوت جالسة وسط شبكتها، وتلتهم أي شيء يقترب منها، ويزداد حجمها بينما تفعل ذلك.

إن نحوَ واحد بالمائة من المجرَّات التي تُرَى على إزاحات حمراء منخفضة يمر على نحوٍ نَشِط بالمراحل الأخيرة من عمليات اندماج؛ بَيْدَ أن هذه العمليات تستغرق وقتًا قليلًا للغاية، مقارَنةً بعمر الكون، لدرجة أن الإحصاءات تشير إلى أن نحو نصف العدد الإجمالي للمجرَّات المرئية بالقرب منَّا نتج عن حالات اندماجٍ بين مجرتَّيْن ذواتَيْ حجم متقارِب عبر السبعة أو الثمانية مليارات عام الماضية. والمجرَّات القرصية نفسها، على غرار درب التبانة، يبدو أنها تكوَّنَتْ من وحدات فرعية أصغر حجمًا، بحيث بدأت بالسطح الكروي وأضافت إلى نفسها بعض الأجزاء مع مرور الوقت. ذكرتُ بالفعل تياراتِ النجوم التي يمكن تفسيرها بوصفها بقايا أجرام أقل حجمًا اقتنصتها مجرَّتُنا، وعن طريق سبر أغوار الماضي على نحوٍ أكبر نجد دليلًا آخَر يدعم هذه الفكرة يتمثَّل في العناقيد الكروية، التي يمكن الاستدلال على أعمارها بدقة جيدة عن طريق دراسة تركيبها باستخدام التحليل الطيفي.

احتوى أوائل النجوم على نذر يسير للغاية من العناصر الأثقل من الهيدروجين والهليوم، بينما امتلأت النجوم الشابة بالعناصر التي صُنعت داخل النجوم السابقة بطريقة معروفة جيدًا. كلُّ عنقودٍ كروي يتكوَّن من نجوم لها العمر ذاته، وهو ما يؤكِّد أنها تكوَّنت معًا من سحابة غاز وغبار واحدة، لكن للعناقيد الكروية أعمارًا مختلفةً فيما بينها، وهو ما يبيِّن أنها تكوَّنت في أزمنة مختلفة. وأقدم هذه العناقيد الكروية يزيد عمره قليلًا عن ١٣ مليار عام، وهو ما يتوافق على نحو طيب مع فهمنا للوقت الذي تكوَّنت فيه أُولَيات المجرَّات. إن تبايُنَ أعمار العناقيد الكروية يدعم فكرة أن الجزء من مجرتنا الواقع خارج الانتفاخ الأصلي للسطح الكروي تكوَّنَ من مئات الآلاف من سُحُب الغاز الأصغر، كلٌّ منها به من المادة ما يساوي نحو مليون كتلة شمسية. وكلما اصطدمت سحابة غاز بالمجرَّة الآخذة في النمو، فمن شأنها أن ترسل موجةً صدمية تتماوج عبر السحابة وتطلق عمليةً لتكوُّن النجوم في قلبها، مكوِّنة عنقودًا كرويًّا جديدًا. ومن شأن السواد الأعظم من المادة الآتية من السحابة أن يرتبط بفعل الجاذبية، وأن يتباطأ بفعل الاحتكاك كي يصير جزءًا من قرص المواد النامي حول انتفاخ السطح الكروي. ظلَّ بعض العناقيد الكروية باقيًا حتى وقتنا الحاضر، بينما تمزَّق البعض الآخَر بفعل القوى المدِّيَّة حين حدث أن أخذتها مداراتها إلى عمق بعيد نحو مركز المجرَّة. إلا أن عمليات المحاكاة الحاسوبية تُظهِر أن عملية الاستقرار هذه بأسرها تعمل فقط داخل الإطار الزمني المتاح — هذا إن حدثت من الأساس — إن كانت توجد مادة مظلمة تسهم في

مجال الجاذبية الإجمالي؛ بحيث يكون مقدار المادة المظلمة أكبر بعدة مرات من المادة الباريونية. ومن دون المادة المظلمة، لا يكون بمقدور المجرَّات القرصية أن تنمو، ولم تكن أي بذور كروية لتوجد بحيث تنمو منها المجرَّات في المقام الأول.

ضمن هذا الإطار المتسق ذاتيًّا، يُنظَر للمجرَّات الصغيرة غير المنتظمة ببساطة بوصفها أجزاءً متخلِّفةً من الأيام المبكرة من عمر الكون. ومع أنه من الصعب رؤية المجرَّات الأصغر على مسافات بعيدة، فمن الممكن السماح بتضمين هذا عند تفسير الإحصائيات، وعند السماح بمثل هذا التحيُّز، تخبرنا المشاهدات بأن أعداد المجرَّات الصغيرة في الحقبة المبكرة من عمر الكون يزيد كثيرًا عمَّا نراه في الوقت الحالي، وهذا تحديدًا ما لنا أن نتوقَّعه لو أن العديد من المجرَّات الصغيرة نمَتْ وزادَتْ في الحجم عن طريق الاندماج، أو ابتُلِعت من جانب مجرَّات أكبر حجمًا. وعلى طرف النقيض، أكثر من نصف مقدار المادة الباريونية في الكون اليوم تحوَّلَ بالفعل إلى مجرَّات بيضاوية عملاقة، يحوي أكبرها من المادة عدة تريليونات المرات (١٠^١٢) مقدار كتلة الشمس؛ أي ما يعادل عشر مجرَّات في حجم مجرَّة درب التبانة مجتمعةً معًا. وهذه المجرَّات يمكن رؤيتها حتى إزاحات حمراء قدرها ١٫٥، لكن دراسات التحليل الطيفي تكشف عن أن العديد منها كان قديمًا في ذلك الوقت، وأن المكونات التي تشكَّلت منها هذه المجرَّات لا بد أنها اندمجت معًا على إزاحات حمراء مقدارها ٤ أو أكثر. لكن مع أن حقبة الاندماج المجرِّي العظيمة قد وقعت منذ أكثر من ١٠ مليارات عام، فإن أهم نقطة على الأرجح هي أن هذه العمليات لا تزال جاريةً في يومنا هذا؛ فالمجرَّات لا تزال منخرِطةً في عمليات تفاعُل واندماج، ولا تزال العناقيد المجرية تتجمع في عناقيد مجرِّيَّة فائقة. وفق هذا المنظور، لا يزال عالَم المجرَّات فتِيًّا، ولم ينضج بعدُ. لكن ما المصير النهائي للمجرَّات؟

الفصل الثامن

مصير المجرَّات

يعتمد مصير المجرَّات على مصير الكون. هناك ثلاثة سيناريوهات أساسية يجب تدبُّرها، ومع أن المنظِّرين خرجوا علينا بالعديد من التنويعات على هذه الأفكار الأساسية، فإن هذه الفروق الدقيقة لا تغيِّر على نحو جذري من الاحتمالات الثلاثة لمصير المجرَّات. الاحتمال الأول هو أن الكون سيواصل تمدُّده بالطريقة عينها تقريبًا التي يتمدَّد بها اليوم، بتسارعٍ ثابت، وتؤيِّد الإحصائيات الخاصة بالمشاهدات المتاحة في الوقت الحاضر هذا الاحتمال، لكن ليس على نحو حاسم بما يكفي لاستبعاد الخيارَيْن الآخَرين. الاحتمال الثاني هو أن معدل التمدد نفسه سيتسارع، أما الاحتمال الثالث فهو أن التسارع سينقلب إلى تباطؤ في نقطةٍ ما في المستقبل القريب؛ ومن ثَمَّ سينهار الكون في «انسحاق عظيم» هو النسخة المعكوسة زمنيًّا للانفجار العظيم.

كل هذه السيناريوهات محض تكهُّنات، وحين ننظر إلى الإطار الزمني المعني فما من جدوى للحديث إلا باستخدام أرقام تقريبية، وبذا نبدأ بالعمر الحالي للكون وقد تمَّ تقريبه إلى ١٠ مليارات عام (١٠^١٠) كنقطة انطلاق. أيضًا نحن نعرف القليل جدًّا عن طبيعة المادة المظلمة، لدرجة أنه من العسير حتى التكهُّن بما قد يحدث لها في المستقبل البعيد؛ ومن ثَمَّ سأركِّز على مصير الباريونات؛ الجسيمات العادية التي نتكوَّن نحن أنفسنا منها.

إذا استمر تمدُّد الكون لوقتٍ طويلٍ بما يكفي، فسيستنفد في نهاية المطاف كلَّ ما هو متاح من غاز وغبار، وستتوقَّف عملية تكوُّن النجوم. وقد خلص الفلكيون، من واقع دراسات تاريخ عملية تكوُّن النجوم في المجرَّات القريبة، ومن المعدل الذي تتكوَّن به النجوم في مجرَّتنا اليوم؛ إلى أن هذا سيحدث في غضون تريليون عام (١٠^١٢) من الآن، حين يكون الكون أكبر عمرًا بمائة مرة ممَّا هو عليه الآن. ستصير المجرَّات المنفردة

أكثر احمرارًا وخفوتًا بينما تخبو نجومها وتبرد، وستُحمَل العناقيد المجرية بعيدًا، بحيث يكون من المستحيل على أيٍّ فلكيين في ذلك الوقت النظر عبر الكون ورؤية أي شيء خارج العنقود المجرِّي الذي يُوجَدون به. ومع موت النجوم داخل كل مجرَّة، سينتهي بها المآل إلى حالة واحدة من ثلاثٍ: فالنجوم ذات الكتلة القريبة من كتلة شمسنا أو الأقل منها ستخبو ببساطة إلى جمرات تُسمَّى «الأقزام البيضاء»، وهي كتلٌ من المادة النجمية تحتوي من المادة على مقدار ما تحتويه الشمس في كرة تماثل كوكب الأرض حجمًا. أما النجوم التي تُنهِي حياتها بكتلة تزيد قليلًا عن هذا، فستنكمش بدرجة أكبر، مكوِّنةً كراتٍ مضغوطة بحيث تحتشد كتلتها التي تقارب كتلة الشمس في حيِّزٍ يماثل قمةَ جبل إفرست، مثال ذلك النجوم النيوترونية التي تماثِل كتلتُها كتلةَ نواة الذرة. أما إذا كان النجم يتمتع بكتلة أكبر عند موته، أو إذا اكتسب النجم النيوتروني ما يكفي من المادة من المنطقة المحيطة به، فسينهار بحيث يصير ثقبًا أسود.

أيضًا تنكمش المجرَّات على هذه الأطر الزمنية الطويلة، وهذا يرجع جزئيًّا إلى أنها تفقد الطاقة من خلال إشعاع الجاذبية، الذي ليس له سوى تأثيرٍ طفيفٍ وفق أي إطار زمني بشري، لكنه يتراكم بدرجة كبيرة عبر تريليونات الأعوام. وتنكمش المجرَّات أيضًا بسبب المواجهات التي تحدث بين النجوم، والتي فيها يكتسب أحد النجوم طاقةً ويُدفَع نحو الفضاء الموجود بين المجرَّات، فيما يفقد النجم الآخَر طاقةً ويهوي إلى مدارٍ أضيق حول مركز المجرَّة. وبالطريقة عينها، ستنكمش أيضًا العناقيد المجرِّيَّة، وفي النهاية ستسقط المجرَّات المنفردة والعناقيد المجرِّية داخل ثقوب سوداء فائقة تكوَّنَتْ بفعل هذه العملية.

يمكنك أن تعتبر هذه نهايةَ القصة؛ لأنه لا شيء يمكن تمييزه بوصفه مجرَّةً سيوجد في ذلك الوقت، لكن ستظل الثقوب السوداء والباريونات موجودةً، على صورة نجوم ملفوظة وبقايا من الغاز. وإذا توافر وقت كافٍ، فإنه حسب نظرية فيزياء الجسيمات فإن هذه المكونات النهائية للكون ستختفي هي الأخرى. وللإشارة إلى الإطار الزمني المعني، سأتجاهل مؤقتًا الثابت الكوني، وأنظر إلى الصورة القديمة التي وفقها يتمدَّد الكون بثبات، لكن ببطء أكثر مع مرور الوقت، وهو ما يمنحنا وقتًا لا نهائيًّا للتدبُّر.

تخبرنا النظريات بأن نفس العمليات التي حوَّلت الطاقة إلى مادة في الانفجار العظيم، من شأنها في النهاية أن تحوِّل المادة إلى طاقةٍ مع تقدُّم الكون في العمر.

والتعبير «في النهاية» هو الأساس هنا؛ فالذرات تتكوَّن من ثلاثة أنواع من الجسيمات: الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات. الإلكترونات جسيمات أساسية مستقرة لا تتكون من مكونات أصغر، أما النيوترونات فلو تُرِكت منفردةً خارج الذرة فستتحلل إلى بروتونات وإلكترونات في غضون دقائق قليلة. وتبدو البروتونات مستقرةً على الأطر الزمنية المقارِبة للعمر الحالي للكون، لكن النظريات تخبرنا بأن البروتونات أيضًا ستتحلل في نهاية المطاف، بحيث يتحوَّل كلٌّ بروتون منها إلى بوزيترون (مكافِئ الإلكترون في المادة المضادة) وأشعة جاما القوية. ثمة أمرٌ مشابه يحدث للنيوترونات في الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية، وفي هذه الحالة تنتج كلُّ عمليةِ تحلُّلٍ إلكترونًا وبوزيترونًا للمحافظة على التوازن الإجمالي للشحنة الكهربية. وتشير المعادلات التي تصف الكيفية التي أُنتِجت بها المادة في الانفجار العظيم إلى أنه في أيِّ كتلة من المادة العادية سيتحلل نصف البروتونات في زمنٍ قدره نحو $١٠^{٣٢}$ أعوام؛ أي إنه في أي كتلة من المادة تحتوي على $١٠^{٣٢}$ بروتونات سيتحلل بروتون منها كل عام أو نحو ذلك، وهذا يساوي عدد البروتونات الموجودة في ٥٠٠ طن من أي مادة؛ سواء أكانت من الماء أو الزُّبد أو الصلب.

وهذا وقت طويل لدرجة تربك العقل، فالرقم $١٠^{٣٠}$ يعني ١٠ مليارات مضروبة في نفسها ثلاث مرات — أي ألف مليار مليار مليار — وفترة $١٠^{٣٢}$ أعوام أطول بمائة مرة من فترة $١٠^{٣٠}$ أعوام. وبعد $١٠^{٣٣}$ أعوام من الآن، إذا استمر التمدُّد الثابت لهذه الفترة، فستكون كل الباريونات التي لم تُبتلَع بالفعل من جانب الثقوب السوداء قد مرَّتْ بعملية التحلُّل هذه إلى إلكترونات وبوزيترونات وطاقة. وكلما التقى إلكترون ببوزيترون، فإنهما يفنيان معًا مُطلِقين دفقةً من أشعة جاما؛ وبذا كل ما سيتخلف من مادة نجمية سينتهي به المطاف إلى إشعاع.

ماذا عن الثقوب السوداء؟ الغريب في الأمر أنها ستعاني المصير ذاته. هناك رابطٌ عميق بين توصيف الثقب الأسود في إطار كلٍّ من النسبية العامة والديناميكا الحرارية ونظرية الكم، ومفتاح هذا الأمر هو ذلك المبدأ الذي يقع في أساس فيزياء الكم والمعروف باسم مبدأ عدم اليقين، وهذا المبدأ يخبرنا أن هناك أزواجًا معينة من الخصائص في العالم الكمي تجتمع بطريقة معينة بحيث يصير من المستحيل لكلتا الخاصيتين في أي زوج أن تمتلكا قيمةً محدَّدة بدقة في الوقت عينه. ليس هذا راجعًا إلى قصورٍ في وسائل القياس، بل هو ملمح أصيل للكيفية التي يسير بها الكون. ومن هذه الأزواج الطاقة والزمن. وفي سياق مصير الثقوب السوداء، فإن ما يهم هو أن عدم اليقين الذي يكتنف العلاقة بين

الطاقة والزمن يخبرنا بأنه لا يوجد حقًّا ما يُسمَّى الفضاء «الخاوي»، فإذا تصوَّرت حيِّزًا صغيرًا للغاية من الفضاء الخاوي، فربما تظن أنه لا يحتوي على أي طاقة على الإطلاق، لكن مبدأ عدم اليقين الكمي يخبرنا بأن هذا الحيِّز «ربما» يحتوي على مقدار معين من الطاقة، بشرط أن يحدث هذا لفترة تقلُّ عن وقت معين. وكلما كبر مقدار الطاقة تحتَّمَ أن يقلَّ مقدار الزمن؛ وبذا يمكن لفقاعة صغيرة من الطاقة أن تظهر إلى الوجود بغتةً، ثم تختفي، دون أن يتم رصدها. وبما أن الطاقة يمكن معادلتها بالكتلة، فإن هذا يعني أن بإمكان أي زوج من الجسيمات — إلكترون وبوزيترون مثلًا — أن يظهر إلى الوجود بغتةً من لا شيء على الإطلاق، بشرط أن يختفي ثانيةً على الفور.

بفرض حدوث هذا عند حافة ثقب أسود، فإنه حتى في الوقت القصير للغاية المتاح، يمكن للثقب الأسود أن يقتنص أحد الجسيمَيْن، بينما يفلت منه الجسيم الآخَر. إلا أن الكون لم يكتسب شيئًا من لا شيء، وبعض كتلة الثقب الأسود استُهلِك في هذه العملية؛ ومن ثَمَّ ينكمش الثقب بمقدار طفيف للغاية. والاندفاع الناتج للجسيمات بعيدًا عن سطح الثقب الأسود يمنحها حرارةً محدَّدةً جيدًا، وهنا يحين دور الديناميكا الحرارية في القصة؛ فبالطريقة التي يعمل بها هذا التأثير، تكون الثقوب السوداء الصغيرة أشد حرارةً، وستتبخر تمامًا بعد أن تنفجر في دفقة من الإشعاع عند النقطة التي تكون فيها الكتلة داخل الثقب الأسود لا تكفيه لعزل نفسه عن بقية الكون. وسيستغرق الثقب الأسود الذي تعادل كتلتُه كتلةَ الشمس ١٠^٦٦ أعوام كي يحدث هذا، حتى لو لم يبتلع أيَّ مادة خارجية طوال هذه الفترة. أما الثقب الأسود الذي تعادل كتلتُه كتلةَ مجرَّة كاملة فسيستغرق ١٠^٩٩ أعوام، وحتى الثقب الذي يحوي من الكتلة ما يعادل كتلة عنقود مجرِّي فائق — أكبر عنقود من المرجح أن يتكوَّن — سيختفي بعد ١٠^١١٧ أعوام، وهذه أقصى الحدود التي يمكن أن نصل بتكهُّناتنا إليها ونظل في الوقت نفسه نتظاهر بأننا نتحدث عن مصير المجرَّات.

لكن ماذا لو لم يكن هناك وقت كي يحدث كل هذا؟ إذا كان الثابت الكوني ثابتًا بحق، فإن معدل تمدُّد الكون يتسارع بمعدل ثابت، وكل شيء خارج نطاق مجموعتنا المحلية من المجرَّات، التي تنتمي إليها مجرَّة درب التبانة، سيُحمَل بعيدًا عن أنظارنا في غضون مائتَيْ مليار عام. فالفضاء خارج فقاعتنا المحلية سيتمدَّد بسرعةٍ تفوق سرعةَ الضوء، ولن تكون أي إشارة آتية من الخارج قادِرةً على أن تصل إلى أيِّ راصدين في مجرَّة درب التبانة، أو أيًّا ما ستكون المجرَّة قد صارت عليه؛ ومن ثَمَّ سيكون هناك أفقٌ

كوني منكمش يعين حد المشاهدات. والعملية التي وصفتُها للتو ستستمر في الحدوث، سواء خارج الفقاعة أو داخلها، لكن من الناحية العملية فإنه في غضون نحو عشرة أضعاف العمر الحالي للكون، لن يكون هناك شيء يمكن رؤيته خارج جزيرة النجوم الآخِذة في الخفوت الممثلة في تلك المجرَّة الفائقة المندمجة، أيًّا كان نوعها، التي تشكَّلت من مكونات المجموعة المحلية. هذا هو التصوُّر الراجح اليوم من منظور التكهُّنات الفلكية، ومع ذلك فهناك احتمالات أكثر دراماتيكية. فماذا لو لم يكن «الثابت» الكوني ثابتًا بالفعل؟

لقد وضعت دراساتُ المستعرات العظمى الحدودَ بشأن المقدار الذي يمكن أن يكون الثابت الكوني قد غيَّر به الكون إبَّان تطوُّره؛ بَيْدَ أنها ليست جيدة بما يكفي بحيث تثبت أن هذا الثابت كان ثابتًا بالفعل منذ الانفجار العظيم؛ فلربما يكون من الأجدر أن نسميه المعامل الكوني؛ وذلك للسماح بإمكانية تغيُّره مع مرور الوقت. وقد شجَّع هذا بعض المنظِّرين على التكهُّن بشأن الكيفية التي يمكن بها — لتغيُّرٍ في قيمة كثافة الطاقة المظلمة للكون — أن يؤثِّر على تمدُّد المكان ومصير المجرَّات. إن الاحتمالَ الأول، الذي يقضي بأن المعدل الذي يتسارع به تمدُّد الكون ربما يكون هو نفسه آخِذًا في التسارع، يغيِّر تمامًا من نظرتنا لموضعنا في الكون؛ لأنه يشير إلى أننا لا نعيش في مرحلة مبكرة من عمر كونٍ مقدَّر له أن يعيش حياة مديدة، ولكن ربما نكون بالفعل قد قطعنا ثلث الطريق منذ الانفجار العظيم وحتى نهاية كل شيء مادي، بل والأكثر إثارةً أن هذه الفكرة تقترح أنه لو ظلت الحياةُ الذكية باقيةً في الكون، فسيتمكَّن الراصدون من مشاهدة هذا الدمار النهائي حتى النهاية تقريبًا (وهذه تكهُّنات تنطبق على أحد النماذج الممكنة للكون، وليست حقائق مؤكدة تنطبق على كوننا. ورأيي الشخصي أنها محض تخيُّلات، وإنْ كانت تخيُّلات ممتعة!)

يُشار إلى هذا السيناريو أحيانًا باسم «التمزُّق العظيم»؛ وذلك لأسباب ستتضح قريبًا. وهو يبدأ من افتراض أن تمدُّد الكون مسئول عن خلق الطاقة المظلمة، وفي الوقت ذاته — كما سبق أن أوضحتُ — تتسبَّب الطاقة المظلمة في جعل الكون يتمدَّد على نحوٍ أسرع. ويعني المزيدُ من التمدد وجودَ المزيد من الطاقة المظلمة، التي تعني بدورها مزيدًا من التمدُّد، الذي يعني مزيدًا من الطاقة المظلمة، وهكذا دواليك. كل هذا متَّسقٌ مع قوانين الفيزياء المعروفة، لكن هذه القوانين لا تفرضه. وإذا ظل المعامل الكوني صغيرًا كما هو اليوم، فلن تجد الأجرامُ على غرار الشمس والنجوم والمجرَّات أي صعوبةٍ

في مقاومة التمدُّد الكوني لمئات المليارات من الأعوام؛ وذلك لأن جاذبيتها تتغلَّب على تأثيرات الطاقة المظلمة. لكن في سيناريو التمزُّق العظيم الجامح، سرعان ما سيأتي وقت تتغلَّب فيه الطاقة المظلمة — التي تعمل كدأبها دومًا كقوة مضادة للجاذبية — على الجاذبية، وحتى الأجرام التي نظنها متماسكة ستتمزَّق إربًا بفعل التمدد. هذا مثال على النمو الأُسِّي، لكن حتى في أقصى سيناريوهات التمزُّق العظيم تطرُّفًا التي تسمح بها المشاهدات، مع أن النهاية ستحدث بعد ما يزيد عن ٢٠ مليار عام؛ فإنه لن يحدث شيء غريب للأجرام التي في حجم المجرَّات حتى المليار عام الأخير أو نحو ذلك.

في ذلك الوقت، ستتغلب الطاقة المظلمة على قوى الجاذبية التي تحافظ على تماسك المجموعة المحلية من المجرَّات معًا، وسيحدث هذا بعد ٢٠ مليار عام من الآن؛ أي أسرع بعشرة مليارات عام مما لو كان الثابت الكوني ثابتًا دون تغيير بالفعل. بحلول ذلك الوقت، ستظل المجرَّة البيضاوية الكبيرة التي تكوَّنت عن طريق اندماج مجرتَيْ درب التبانة وأندروميدا موجودةً على صورة يمكن التعرُّف عليها، ومع أن الشمس ستكون قد فنت منذ ما يزيد عن العشرة مليارات عام، فقد تكون هناك كائنات ذكية تعيش على كواكب أخرى شبيهة بالأرض تدور حول نجوم شبيهة بالشمس، وتكون قادرةً على أن تشاهد ما سيحدث بينما يواصل حجم المعامل الكوني الزيادة، وسيظل «الأفق» الكوني في ذلك الوقت على مسافةٍ قدرها نحو ٧٠ ميجا فرسخًا فلكيًّا.

وبدايةً من هذه النقطة، يكون من المنطقي ألَّا نقيس مرور الأحداث بالزمن المنقضي منذ الانفجار العظيم، وإنما بالزمن المتبقي على التمزُّق العظيم. فقبل نحو ٦٠ مليون عام على النهاية، ستبدأ مجرَّتنا — وكل المجرَّات — في التبخُّر مع بلوغ الطاقة المظلمة درجةً من القوة تجعلها تتغلَّب على قوة الجاذبية بين النجوم، لكن سيظل من الممكن لأي منظومة كوكبية كالمجموعة الشمسية أن تهيم عبر الفضاء دون ضرر. وقبل التمزُّق العظيم بثلاثة أشهر فقط، ستكون الروابط الجذبية التي تجمع الكواكب بنجومها قد ضعفت، وأيُّ حضارةٍ لديها من التكنولوجيا ما يمكِّن الراصدين من البقاء أحياءً بعد هذه الكارثة ستصل إلى نهايتها حين يتمزَّق كوكبها إربًا بفعل التمدُّد الكوني، وهو ما سيحدث قبل حوالي نصف ساعة من نهاية المادة. وفي الكسر الأخير من الثانية، ستتمزق الذرات والجسيمات إربًا حتى تصير عدمًا، مخلِّفة وراءها زمكانًا منبسطًا خاويًا. وتقترح بعض النسخ المتطرفة من هذه الفكرة أنه قد يُولَد كون جديد من هذا الفراغ، وأن كوننا ربما يكون قد نشأ من فراغ كهذا. لكن من منظور المجرَّات، يمكن القول بأنه لو صحَّ

هذا السيناريو فإن النهاية ستقع بعد حوالي ٢٠ مليار عام، وقبل ٦٠ مليون عام على التمزُّق العظيم.

لكن ماذا لو افترضنا أن المعامل الكوني يتناقص مع مرور الوقت؟ فقد يقلُّ وصولًا إلى الصفر، وهو ما يعيدنا مجدَّدًا إلى صورة الكون الآخِذ في التمدُّد إلى الأبد، مع فناء المادة وتبخُّر الثقوب السوداء، هذه الصورة التي بدأتُ بها هذا الاستعراض. لكن لماذا نتوقَّف عند هذا الحد؟ إن المعادلات تسمح بإمكانية أن يصير هذا العامل سالبًا، وهذا يجعل فناء الكون أقرب، بل ربما يكون الوقت الذي يفصلنا عنه في المستقبل أقل من الوقت الذي يفصلنا عن الانفجار العظيم في الماضي. لكن النهاية ستأخذ شكلًا مختلفًا هذه المرة؛ إذ لن تأتي على صورة تمزُّق عظيم، وإنما على صورة «انسحاق عظيم»، وهو حدثٌ مكافئ للانفجار العظيم، ولكن على نحو معكوس.

ومجدَّدًا سأستخدم أكثر النسخ تطرُّفًا للسيناريو المتفق مع مشاهداتنا للكون الفعلي ومع قوانين الفيزياء المعروفة. وتمامًا مثلما يعمل المقدار الموجب من الطاقة المظلمة عمل الجاذبية المضادة، ويجعل الكون يتمدَّد على نحو أسرع، يعمل المقدار السالب من الطاقة المظلمة عمل الجاذبية ويجذب أجزاء الكون بعضها إلى بعض، بحيث يمكن عكس التمدُّد الكوني. وتشير المشاهدات التي أُجرِيت إلى الآن، مقترنةً بالاعتبارات النظرية، إلى وجود نطاق من الاحتمالات لهذا النوع من الانخفاض في قيمة المعامل الكوني، وهو ما يعني أن الانسحاق العظيم يمكن أن يحدث في وقت قريب مقداره ١٢ مليار عام من الآن، أو في وقت بعيد في المستقبل يصل إلى ٤٠ مليار عام من الآن. وكشأن الحالة السابقة، من الأفضل توصيف الأحداث من منظور الزمن المتبقِّي على النهاية، وهو ما يمكن التعبير عنه أيضًا من حيث الحجم المنكمش للجزء القابل للرصد من الكون. وبما أن كل شيء ينكمش بالطريقة عينها، بما في ذلك أُفقنا، فإن العمليات نفسها تمامًا ستجري في كل مكان في الآن عينه. وبحلول ذلك الوقت، لن يكون الراصدون الأذكياء موجودين ليشهدوا سكرات موت الكون.

حين يتوقَّف تمدُّد الكون ثم يبدأ في السير على نحو معكوس، فإنه سيؤثِّر على كل شيء في الكون في الآن عينه؛ لأن المكان نفسه يتأثَّر بفعل القيمة المتغيرة للمعامل الكوني. لكن بسبب الوقت المحدود الذي يستغرقه الضوء في الانتقال عبر الفضاء، فأي راصدٍ سيوجد بعد انعكاس التمدُّد مباشَرةً، أينما كان في الكون، لن يرى كونًا تهيمن عليه المجرَّات ذات الإزاحة الزرقاء. فالضوء القادم من المجرَّات القريبة سيُزاح إزاحة زرقاء،

لكن الضوء القادم من المجرَّات البعيدة، الذي قضى السواد الأعظم من رحلته وهو يعبر فضاءً آخِذًا في التمدُّد، سيظل على إزاحته الحمراء. وستكون أي حضارة معمرة قادرة على أن تحتفظ بسجلاتٍ تبيِّن انتشارَ «أفق الإزاحة الزرقاء» إلى الخارج بسرعة الضوء، إلى أن تسود الإزاحات الزرقاء في نهاية المطاف بالفعل.

وفيما يخص المجرَّات، فإن انهيار الكون لن يؤثِّر عليها لمليارات الأعوام، وستتواصل عمليات تكوُّن النجوم والاندماج المجرِّي التي وصفتُها سلفًا كما في السابق، مع اقتراب العناقيد المجرِّيَّة بعضها من بعض واندماجها في النهاية، وستصير عمليات اندماج المجرَّات أكثر شيوعًا، لكن دون أن يسبِّب ذلك أي مشكلات لأشكال الحياة التي تعيش على كواكب كالأرض؛ بل سيأتي تهديد الحياة بالفعل من أضعف ملامح كوننا تأثيرًا في الوقت الحالي؛ أي إشعاع الخلفية المتخلِّف عن الانفجار العظيم.

إن إشعاع الخلفية الميكروني الكوني متخلِّف عن الكرة النارية التي وُلِد منها كوننا. وبين ٣٠٠ ألف عام و٤٠٠ ألف عام بعد الانفجار العظيم، وقت حدوث الانفصال بين المادة والإشعاع، كانت درجة حرارة هذا الإشعاع تناهِز حرارة سطح أي نجمٍ اليوم، ثم بردت حرارته حتى وصلت إلى ٢٫٧ درجة كلفينية (–٢٧٢٫٣ درجة مئوية) بينما استطال كي يملأ الفضاء المتاح. لكن حين ينكمش الفضاء المتاح، سيُزاح الإشعاع إزاحة زرقاء وينضغط، بحيث ترتفع حرارته في عملية معاكسة تمامًا لتلك التي أدت إلى برودته. وفي الوقت الذي تكون فيه العناقيد المجرِّيَّة قد بدأت في الاندماج، وتكون كلُّ المجرَّات بدأت الانخراط في عمليات اندماج، سيكون حجمُ الكون واحدًا على المائة من حجمه الحالي، وستكون درجةُ حرارة السماء نحو ١٠٠ درجة كلفينية، وهو رقم ليس كافيًا لإثارة القلق بعدُ. لكن في غضون بضعة ملايين الأعوام، ستتجاوز حرارة إشعاع الخلفية درجة ذوبان الجليد: ٢٧٣ درجة كلفينية، ولن يكون هناك أي ثلج أو جليد في أي مكان في الكون. ربما تظل الحياة ممكنةً، لكن مع مواصلة درجة الحرارة في الارتفاع ستتجاوز الحرارةُ نقطةَ غليان الماء: ٣٧٣ درجة كلفينية، وسرعان ما تبدأ السماء كلها في التوهُّج بدرجة أكبر وأكبر مع مرور الوقت.

وقبل الانسحاق العظيم بملياريْ عام، ستصير الحياةُ مستحيلةً، وستتشوَّه المجرَّات إلى مجموعة مبعثرة من النجوم. وقبل النهاية بأقل من المليون عام بقليل سوف «تتفكَّك» كلُّ المادة الباريونية — خلا تلك الموجودة في مأمن داخل النجوم — إلى مكوِّناتها المشحونة كهربيًّا، وفي ذلك الوقت ستعاود المادة والإشعاع الاتحادَ في عناقٍ حميمٍ. وهذا

حدثٌ معاكِس تمامًا لعملية الانفصال التي وقعت بعد الانفجار العظيم، وستقع هذه العملية في وقت مماثل تمامًا — قبل النهاية بحوالي ٣٠٠ ألف إلى ٤٠٠ ألف عام — للوقت الذي وقعت فيه عملية الانفصال بعد البداية. الفارق هو أن النجوم — أو على الأقل قلوبها — يمكنها البقاء في هذه الكرة النارية إلى أن يصل الكون إلى واحدٍ على المليون من حجمه الحالي وتتجاوز درجة حرارته ١٠ ملايين درجة، وهو ما يقارب الحرارة داخل النجوم؛ وعندئذٍ فحتى قلوب النجوم ستذوب في الكرة النارية. وفي النهاية، سيختفي كل شيء في نقطة تفرُّد، مثل نقطة التفرُّد الموجودة في قلب أيِّ ثقب أسود، أو تلك التي وُلِد منها الكون.

وهذا يقودنا إلى تكهُّنٍ مثيرٍ للاهتمام يقضي بأن كوننا ربما يكون قد وُلِد بنفس الطريقة تمامًا، من انهيار كون سابق، أو مرحلة سابقة من كوننا، وهو ما قد يستتبع وجود دورة متكررة من التمدد والانهيار والارتداد. لكن ليس أيٌّ من هذا له علاقة بمصير المجرَّات التي نراها في كوننا؛ ففي سيناريو الانسحاق العظيم، ستتشوَّه المجرَّات إلى درجةٍ يستحيل معها التعرُّف عليها قبل النهاية بحوالي مليار عام، ربما بعد نحو ١١ مليار عام من الآن.

لكنَّ سيناريوهَي التمزُّق العظيم والانسحاق العظيم محض تكهُّنات أُقدِّمها هنا بالأساس كي أبيِّنَ حدودَ ما يمكن أن يحدث. ففي حدود علمنا، ليس من الممكن أن يعاود الكون الانهيار في وقتٍ يقل عن ١٢ مليار عام، كما أن التمزُّق العظيم لن يطيح بالمجرَّات إلا بعد نحو ٢٠ مليار عام. منذ ثلاثين عامًا كان هناك قدر مماثل من عدم اليقين، يتراوح بين ١٢ مليار عام و٢٠ مليار عام، في تقديرات الفلكيين للزمن الذي انقضى منذ الانفجار العظيم؛ بَيْدَ أن هذا الزمن قد تحدَّدَ بدقة اليوم بالرقم ١٣٫٧ مليار عام، وهذا تقدُّمٌ كبير، وربما نأمل في حدوث تقدُّمٍ مماثل في الأعوام الثلاثين القادمة فيما يخص فهمنا لمصير الكون.

إلا أن أفضل تكهُّنٍ حاليٍّ لمصير المجرَّات هو أن الثابت الكوني ثابت بحق، وأنه مع أن التسارع التدريجي في معدل تمدُّد الكون قد يتسبَّب في حدوث تمزُّق عظيم بطيء في نهاية المطاف، فإن هذا سيحدث في وقت بعيد للغاية في المستقبل، لدرجة أنه لا يستحق أن نشغل أنفسنا به. وفق تلك الصورة، فإن المجرَّات آمِنة لمدة بضعة مليارات الأعوام القادمة؛ أي ما يزيد عن عشرة أضعاف عمر الكون الحالي، وسيكون هناك وقت وفير كي يتوصَّل راصدون آخَرون أذكياء إلى الكيفية التي سينتهي بها كل شيء بدقة.

مسرد المصطلحات

الاندماج النووي: عملية دمج النوى الخفيفة (وعلى الأخص نوى الهيدروجين) بحيث تُكَوِّن نوًى أثقل (وعلى الأخص نوى الهليوم). وهذا التفاعل يُطلِق طاقةً ويجعل النجوم تضيء في سطوع، كما الحال مع شمسنا.

التحليل الطيفي: أسلوبٌ لتحليل الضوء القادم من النجوم أو المجرَّات عن طريق نشره إلى طيف.

التزيُّح: الحركة الظاهرية لجرمٍ ما عبر السماء عند رصده من مواضع مختلفة.

الثابت الكوني: رقم يشير إلى مقدار الطاقة المظلمة الموجودة في الكون.

الثقب الأسود: أي جرم ذي قوة جذب قوية للغاية لدرجة أن سرعة الإفلات منه تفوق سرعة الضوء. والثقوب السوداء الفائقة الضخامة هي بذور المجرَّات.

الخمود: خفوت الضوء القادم من النجوم البعيدة بسبب الغبار الموجود على مسار شعاع خط الرؤية.

الطاقة المظلمة: نوع غير مرئي من الطاقة، تُعرَف أيضًا باسم حقل لامدا، ويُظَن أنها تملأ الكون بأسره، ولها تأثير مضاد للجاذبية، بحيث تزيد من المعدل الذي يتمدد به الكون.

العنقود الكروي: كرة من النجوم توجد في المناطق الخارجية من المجرَّة، كمجرَّة درب التبانة. قد يحتوي العنقود الكروي الواحد على ملايين من النجوم المنفردة.

القرص المزوِّد: قرص من المادة التي تدور حول نجم أو ثقب أسود أو أي جرم آخَر، تدور منه المادة على نحو حلزوني إلى الداخل كي تسقط في الجرم المركزي.

الكون: كل شيء يمكننا رؤيته أو التأثُّر به؛ بمعنًى آخَر: العالم الحقيقي. أيضًا يمكن استخدام الكلمة عينها للإشارة إلى نموذج نظري، مبنيٍّ على حسابات و/أو مشاهدات لما قد يكون عليه العالم الذي نسكنه.

المادة المظلمة الباردة: المكوِّن المادي الأساسي للكون، وهي موجودة بنسبةٍ تُقارِب ٦ إلى ١ مقارَنةً بالمادة العادية. ويتكشَّف وجود المادة المظلمة الباردة من واقع تأثيرها الجذبي، لكن لا أحد يعلم ماهيتها بالضبط.

المجرَّة الحلزونية: انظر المجرَّة القرصية.

المجرَّة: يُقصَد بها أيٌّ من الجزر النجمية المقدَّر عددها بمئات المليارات الموجودة في الكون.

المستعر الأعظم (سوبرنوفا): السطوع المفرط لنوع معين من النجوم عند نهاية حياتها، ويمكن للنجم في هذه المرحلة أن يسطع لفترة وجيزة بدرجة تفوق سطوع مجرَّةٍ بأكملها من النجوم المماثلة لشمسنا.

المستعر: السطوع المفاجئ لنجمٍ، الذي يجعله يبدو كأنه جرم «جديد» في السماء.

تأثير دوبلر: هو إزاحة في خطوط الطيف (الخاصة بأحد النجوم على سبيل المثال) نحو الطرف الأحمر من الطيف إذا كان النجم آخِذًا في الابتعاد عن الراصد، ونحو الطرف الأزرق إذا كان آخِذًا في الاقتراب منه.

ثابت هابل: رقم يحدِّد السرعة التي يتمدَّد بها الكون اليوم. ويتغير معدل التمدُّد مع مرور الوقت.

حقل لامدا (Λ)**:** انظر الطاقة المظلمة.

درب التبانة (الطريق اللبني): حزمة من الضوء تنتشر بعرض سماء الليل تتألَّف من عدد كبير من النجوم البعيدة للغاية، لدرجة أنه يتعذَّر رؤيتها على نحوٍ منفرد بالعين المجردة. انظر أيضًا «المجرَّة».

سرعة الإفلات: الحد الأدنى من السرعة، المطلوب كي يفلت الجسم من قبضة الجاذبية الخاصة بجسم آخَر. سرعة الإفلات من سطح كوكب الأرض تساوي ١١٫٢ كيلومترًا في الثانية.

مبدأ العادية الأرضية: الفكرة القائلة بأننا لا نشغل موضعًا مميزًا في الكون، وأن بيئتنا الكونية مماثِلة لبيئة أي نجم في مجرَّة قرصية.

مجرَّة بيضاوية (إهليلجية): منظومة ضخمة من النجوم ليست لها بنية داخلية واضحة، ويكون شكلها الإجمالي شبيهًا بشكل الكرة المستخدَمة في لعبة كرة القدم الأمريكية.

مجرَّة قُرصية: منظومة مؤلَّفة من مئات مليارات النجوم، أغلبها يقع في قرص مسطح، حيث يمكنها أن تشكِّل بنيةً حلزونية. مجرَّة درب التبانة التي تضم مجموعتنا الشمسية هي مجرَّة قرصية.

نجم قيفاوي: نوع من النجوم المتغيرة تجعله خصائصُه مفيدًا في حساب المسافات عبر مجرَّة درب التبانة والمسافات إلى المجرَّات القريبة.

قراءات إضافية

Richard Berendzen, Richard Hart, and Daniel Seeley, *Man Discovers the Galaxies* (Columbia UP, 1984).

Peter Coles, *Cosmology: A Very Short Introduction* (OUP, 2001).

Arthur Eddington, *The Expanding Universe* (CUP, 1933).

John Gribbin, *Space* (BBC Worldwide, 2001).

John Gribbin, *Science: A History* (Allen Lane, 2002).

Alan Guth, *The Inflationary Universe* (Cape, 1996).

K. Haramundanis ed. *Cecilia Pagne-Gapschkin: An Autobiography and Other Recollections* (Cup, 1984).

Michael Hoskin, 'The Great Debate', *Journal for the History of Astronomy,* 7 (1976), 169–82.

http://antwrp.gxfc.nasa.gov/apod/ (for the observations in Hawaii, Chapter 3).

Edwin Hubble, *The Realm of the Nebulae,* Dover, 1958 (repr. of 1936 edn).

Malcolm Longair, *Our Evolving Universe* (CUP, 1996).

Denis Overbye, *Lonely Hearts of the Cosmos* (HarperCollins, 1991).

Martin Rees, *Before the Beginning* (Simon & Schuster, 1997).

Michael Rowan-Robinson, *The Cosmological Distance Ladder* (Freeman, 1985).

Thomas Wright, *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe* (Chapelle, 1750; facsimile edn, ed. Michael Hoskin, Macdonald, 1971).

مصادر الصور

(7-1) © V. Springel, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching, Germany.

(7-2) © Royal Observatory, Edinburgh/SPL.